

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

ПО КУРСУ «ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ»

для студентов специальности 7.091302
«Метрология и измерительная техника»
дневного и заочного обучения

Харьков НТУ «ХПИ» 2002

ПРЕДИСЛОВИЕ

Методический практикум составлен в соответствии с программой утверждённой Министерством образования Украины по курсу “Цифровые измерительные приборы”.

Сборник содержит методические указания к лабораторным работам, охватывающим все основные разделы курса.

В лабораторных работах рассматриваются принципы действия цифровых измерительных приборов (ЦИП) и их отдельных узлов, даётся методика анализа погрешностей и факторов, которые их вызывают. Описание сопровождается краткими сведениями по теории и подробным описанием методики выполнения работы.

Две первые работы посвящены изучению таких элементов и узлов ЦИП как счётчики, дешифраторы, цифровые индикаторы, преобразователи код–напряжение. В следующей работе исследуются измерители частотно–временной группы, входящие в состав универсального прибора для измерения частоты, периода и временного промежутка. Изучению приборов основных групп, таких как приборы уравнивающего, временного и частотного преобразования посвящены последующие работы. Завершает лабораторный практикум работа по изучению принципа исследования статистических погрешностей. На примере устройства дистанционных измерений рассматривается методика анализа методических погрешностей.

Лабораторный практикум является учебным пособием для студентов дневного и заочного обучения специальности “Метрология и вычислительная техника”. Сборник составлен коллективом авторов, участие которых в написании той или иной работы указано в оглавлении.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Работа №1. Исследование счётчиков импульсов, дешифраторов и цифровых индикаторов (Татарский П.И., Тополов И.И.)
2. Работа № 2. Исследование преобразователя код-напряжение (Полулях К.С.)
3. Работа № 3. Исследование цифровых измерительных приборов поразрядного уравнивания (Полулях К.С., Татарский П.И.)
4. Работа № 4. Исследование измерителей частоты, периода и временных интервалов (Полулях К.С., Татарский П.И.)
5. Работа № 5. Исследование вольтметра временного преобразования (Полулях К.С., Татарский П.И., Медведева Л.А.)
6. Работа № 6. Исследование вольтметра частотного преобразования (Полулях К.С.)
7. Работа № 7. Исследование статических и динамических погрешностей измерительных устройств (Полулях К.С.)

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИССЛЕДОВАНИЕ СЧЁТЧИКОВ ИМПУЛЬСОВ, ДЕШИФРАТОРОВ И ЦИФРОВЫХ ИНДИКАТОРОВ

Цель работы

Ознакомление с принципами построения двоичных и двоично-десятичных счетчиков импульсов и изучение их работы. Исследование быстродействия счетчиков импульсов. Приобретение навыков синтеза дешифраторов к двоично–десятичным счётчикам.

1 Описание лабораторного макета

Лабораторный макет состоит из трех основных узлов:

- а) схемы, позволяющей реализовать различные виды счетчиков импульсов и формировать сигналы, подаваемые на вход счетчика;
- б) набора логических элементов для построения дешифратора;
- в) цифровых индикаторов двух типов со схемами управления.

1.1 Цифровые счетчики импульсов (СИ)

В лабораторном макете для построения различных схем СИ применены триггеры в интегральном исполнении типа 155 ТВІ, представляющие собой ТТЛ схемы. Триггер этого типа является универсальным JK – триггером с логикой ЗИ на входах J и K, т.е. он имеет объединенные посредством схем И три входа J и три входа K. Этот триггер имеет также тактовый вход C, неактивируемые установочные входы \bar{S} и \bar{R} , прямой (единичный) и инверсный (нулевой) выходы Q и \bar{Q} .

По внутренней структуре триггер 155 ТВІ представляет собой двухступенчатый JK–триггер. Поэтому он относится к триггерам, тактируемым фронтом 1/0, т.е. новая информация появляется на его выходе только после окончания действия входного тактирующего импульса.

Для реализации различных схем СИ в макете используется 4 триггера. Коммутация связей между триггерами, предусмотренная в макете, позволяет реализовать 2 схемы двоичных счетчиков и 10 схем двоично-десятичных счетчиков.

1.1.1 Двоичные СИ. Двоичные счетчики импульсов имеют выходной код двоичный, а их модуль счета, или коэффициент пересчета, равен 2, где n – число разрядов (триггеров) счетчика. Они могут быть суммирующими и вычитающими. В зависимости от характера переключения триггеров в процессе счета все счетчики делятся на асинхронные и синхронные.

Двоичные асинхронные счетчики строятся на основе счетных триггеров, соединенных последовательно, т.е. выход одного триггера соединен со счетным входом другого.

На рисунке 1 изображена схема двоичного асинхронного суммирующего четырехразрядного СИ макета. В этой схеме JK - триггеры работают в режиме счетного триггера. Тактовый вход С JK–триггера при этом является счетным входом триггера.

При соединении триггеров в двоичном счетчике выходом для переноса в каждый старший разряд может являться выход Q или \bar{Q} предыдущего триггера в зависимости от типа или схемы триггера. Из записи последовательного ряда возрастающих на единицу чисел в двоичной системе счисления следует, что перенос в старший разряд должен осуществляться при переходе младшего разряда из 1 в 0, а для ряда убывающих чисел перенос должен быть при переходе младшего разряда из 0 в 1. Поэтому в суммирующем счетчике в качестве выхода для переноса выбирается тот выход триггера, на котором при переходе этого триггера из 1 в 0 образуется фронт импульса (или импульс), способный изменить состояние следующего триггера. Так как используемые триггеры в счетчике рисунка 1 срабатывают от фронта 1/0, то в качестве выходов переноса используются прямые выходы триггеров, которые соединяется со счетными входами последующих триггеров.

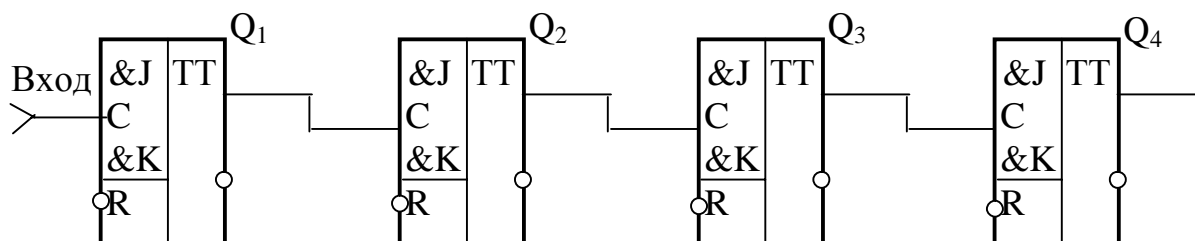


Рисунок 1

Информационными выходами счётчика рисунок 1, в частности, и всех СИ вообще являются прямые и инверсные выходы триггеров счетчика. При этом с прямых выходов снимается прямой код числа импульсов, поступивших в СИ, а с инверсного – обратный код.

Схема вычитающего асинхронного двоичного СИ изображена на рисунке 2. Он отличается от суммирующего лишь связями между триггерами. Для используемых триггеров в вычитающем счетчике выходом переноса является инверсный выход, который и соединяется со счетным входом следующего триггера.

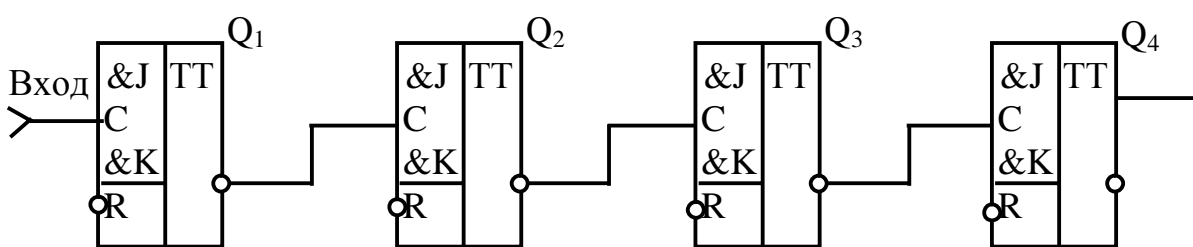


Рисунок 2

1.1.2 Методика построения двоично–десятичных СИ и их схемы, реализованные в макете. Двоично–десятичные СИ имеют коэффициент пересчета 10^m , где m – число декад (десятичных разрядов) счетчика. Их выходным кодом является какой-либо двоично–десятичный код. Они строятся по декадному принципу. Для построения одной декады двоично–десятичного СИ используется четырехразрядный двоичный счетчик, в котором исключают 6 избыточных состояний. Исключение избыточных состояний может осуществляться различными способами.

Один из способов состоит в распознавании кодовой комбинации двоичного СИ, соответствующей 10 импульсам, поступившим на вход счетчика, и принудительном сбросе триггеров СИ в 0. При этом 6 состояний двоичного СИ оказываются запрещенными и счетчик становится двоично–десятичным.

Второй способ заключается в построении прямых и обратных логических связей между разрядными (триггерами) счетчика, которые запрещают 6 каких-либо состояний двоичного счетчика. В зависимости от выбранного способа и вида логических связей одним и тем же десятичным числам входных импульсов в различных СИ могут соответствовать

различные четырехразрядные двоичные кодовые комбинации, т.е. эти счетчики будут работать в различных двоично–десятичных кодах.

На рисунке 3 изображена схема асинхронного двоично-десятичного 'СИ макета, в которой использован способ распознавания. Десяти входным импульсам соответствует кодовая комбинация $Q_4, \bar{Q}_3, Q_2, \bar{Q}_1$ **Ошибка! Ошибка связи.** (1010). Так как триггеры СИ устанавливаются в 0 уровнем логического 0, то минимизированное логическое уравнение схемы распознавания запишется: $P = \bar{Q}_4 Q_2$. Эта функция реализуется элементом D_1 (см. рисунок 3), выход которого соединен со входом \bar{R} триггеров счетчика.

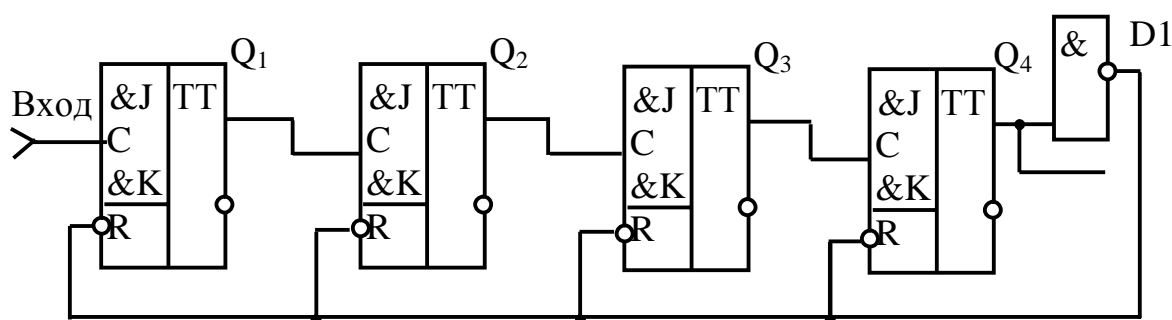


Рисунок 3

На рисунках 4-11 изображены схемы асинхронных двоично-десятичных СИ, в которых за счет прямых и обратных логических связей обеспечивается запрет шести каких-либо состояний четырехразрядного двоичного СИ. В зависимости от схемы связей запрещенными оказываются различные состояния и счетчики работают в различных двоично–десятичных кодах.

Счётчики, изображенные на рисунках 4–7 и рисунках 10, 11, работают в несамодополняющихся кодах, а счетчики рисунков 8 и 9 – в самодополняющихся. Счетчики по схемам рисунков 4, 5, 10, 11 по укрупненной структуре подобны. Они построены по схеме 2x5: их триггер Q_1 является делителем частоты на 2, а триггеры Q_2, Q_3 и Q_4 – делителем на 5 счётчики изображенные на рисунках 6 и 7, построены по схеме 5x2: их триггеры Q_1, Q_2, Q_3 образуют делитель частоты на 5, а триггер Q_4 – делитель на 2.

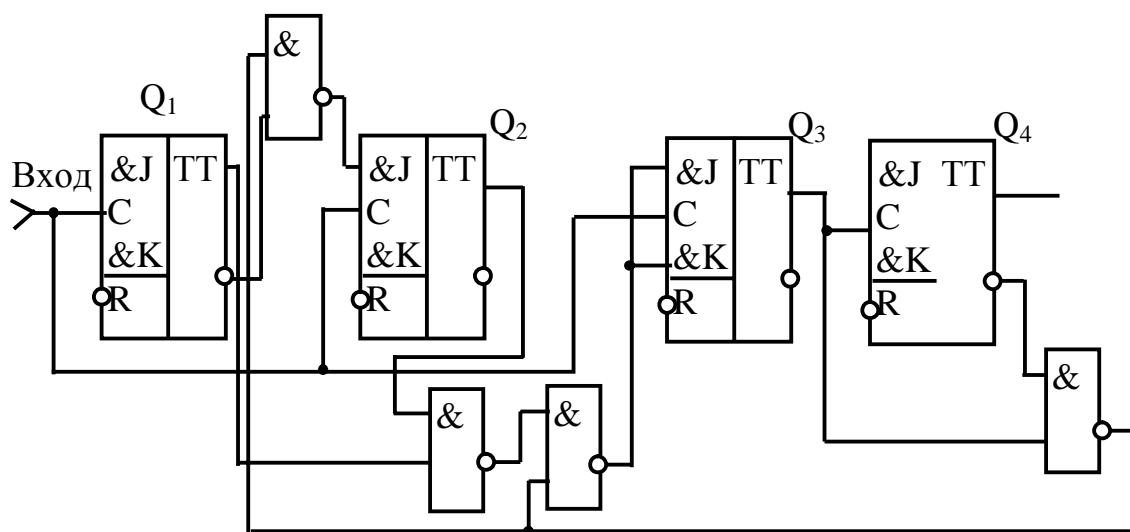


Рисунок 8

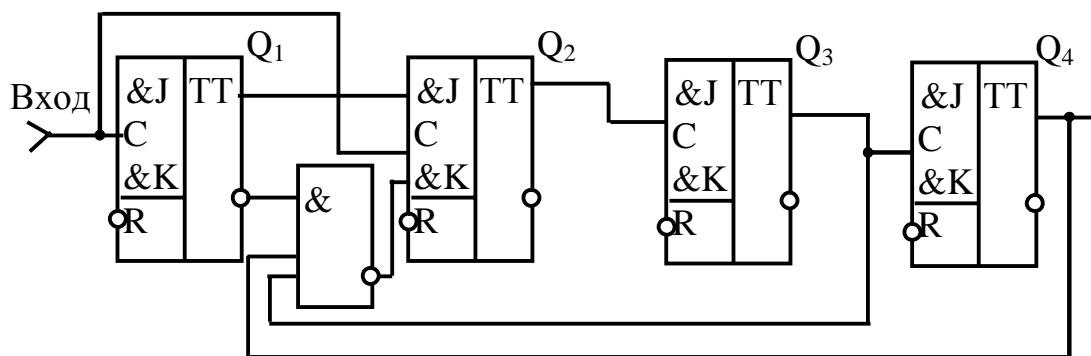


Рисунок 9

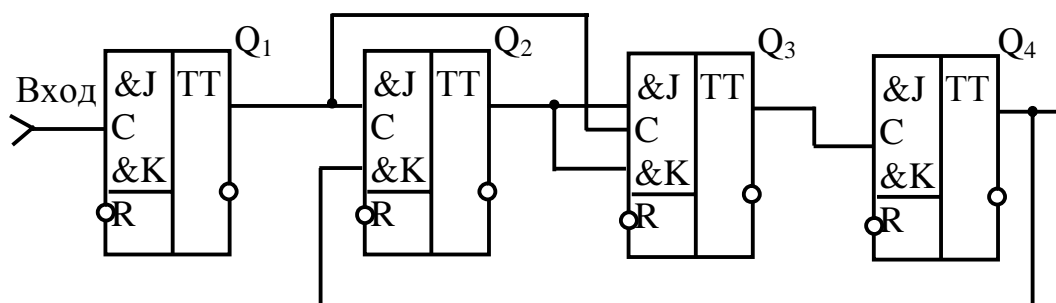


Рисунок 10

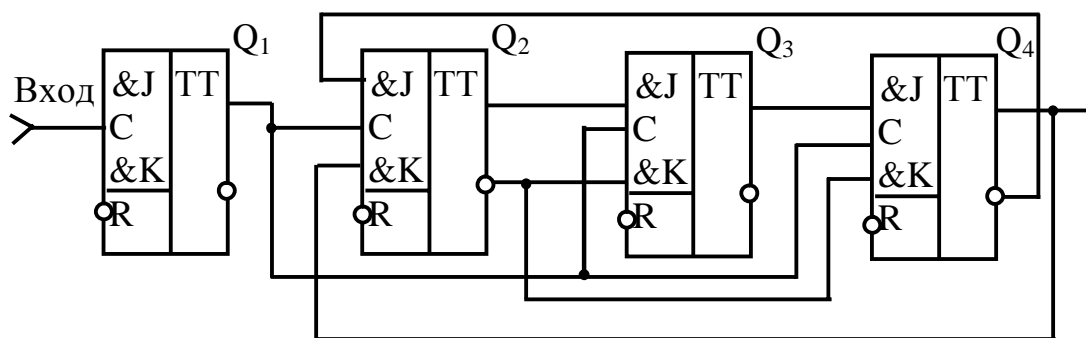


Рисунок 11

Индикация состояний триггеров счетчиков осуществляется с помощью светодиодов, расположенных в центре графического обозначения триггеров на макете. Светодиоды подключены к прямым выходам триггеров, поэтому при единичном состоянии триггера светодиод загорается (излучает свет), а при нулевом состоянии – не загорается. Для измерения частоты входных и выходных импульсов счетчиков, что необходимо при исследовании быстродействия СИ, в макете имеются гнезда « $f_{вх}$ » и « $f_{вых}$ ».

1.2 Цифровые индикаторы (ЦИ) и дешифратор

В макете применены два цифровых индикатора: ИН-4 и ИВ-16. Индикатор ИН-4 представляет собой двуханодный ЦИ тлеющего разряда с десятью катодами, выполненными по форме цифр от 0 до 9.

Катоды объединены в две группы четных и нечетных цифр с анодом на каждую группу. Схема управления этим индикатором (она изображена на лицевой панели макета) состоит из 10 транзисторных ключей, включенных в цепь катодов, и 2 транзисторных ключей, включенных в цепь анодов индикатора, а также переключателя S_1 , позволяющего попарно соединять катоды двух рядом стоящих цифр: 0 и 1, 2 и 3 и т.д. Для открывания ключа в цепи какого-либо катода ЦИ на его управляющий вход необходимо подать уровень логического 0, т.е. этот индикатор управляется инверсными сигналами. Управление группой четных и нечетных цифр осуществляется прямыми сигналами (уровнем логической 1), которые подаются на вход ключей ЧЁТН. и НЕЧЁТ.

Индикатор ИВ-16 представляет собой семиэлементный ЦИ накаливания, элементы которого образуют цифру 8. Цифры от 0 до 9 в этом индикаторе синтезируются зажиганием тех или иных элементов индикатора. Управляющими сигналами для индикатора являются сигналы с уровнем логической 1, т.е. этот индикатор управляется прямыми сигналами.

Для реализации схемы дешифратора в макете применены двух- и четырёхходовые ТТЛ схемы И-НЕ, входы и выходы которых выведены на гнезда лицевой панели макета.

Опыт 1. Изучение работы счетчиков импульсов

Перед выполнением опыта необходимо изучить по принципиальным

схемам работу счетчиков импульсов, приведенных в разделе 2.1. В опыте снимают состояния триггеров счетчиков при подаче на вход одиночных импульсов и по ним определяют код, в котором работает каждый счетчик.

Опыт выполняется в такой последовательности:

1. Включить питание макета выключателем СЕТЬ. Переключатель РЕЖИМ макета установить в положение ОДИНОЧ., чем обеспечивается подача на вход СИ одиночных импульсов с помощью кнопки СЧЁТ.

2. Снять состояния двоичного суммирующего. СИ. Для этого переключателем № СХЕМЫ включить схему 1, а кнопкой СБРОС установить триггеры счетчика в исходное (нулевое) состояние. С помощью кнопки СЧЁТ подавать на вход счетчика одиночные импульсы, а по состоянию светодиодов у триггеров счетчика снять состояния триггеров (1 или 0) после каждого поданного импульса и занести их в таблицу 1. Число поданных на вход счетчика импульсов N_x отмечается в графе N_x , со знаком «+» (суммирующий счетчик).

Таблица 1

N_x “+”	Состояние триггеров				N_x “-”
	Q_4	Q_3	Q_2	Q_1	
0					
1					
2					
...					
...					
14					
15					
Код					

3. По таблице состояний счетчика определить код, в котором он работает, и записать его в строку КОД таблицы 1. При взвешенном коде его определение сводится к присвоению весов разрядам кода таким образом, чтобы кодируемое число находилось как сумма весов тех разрядов кода числа, которые находятся в состоянии 1. Отсюда следует, что в строке «код» таблицы 1 должны быть записаны веса разрядов $Q_4 - Q_1$.

4. Включить на макете схему двоичного вычитающего СИ (схему2) и установить триггеры в нулевое состояние. Снять состояния триггеров

этого СИ. Для этого на вход счетчика подают одиночные импульсы, после каждого импульса сравнивают состояние триггеров счетчика с состояниями, записанными в таблицу 1. В графу N_x со знаком «-» записывают число поданных на вход импульсов против той строки, в которой кодовая комбинация совпадает с кодовой комбинацией (состоянием триггеров) счетчика.

5. Снять состояния триггеров двоично–десятичных счетчиков, заданных руководителем. Методика выполнения такая же, как и при снятии состояний двоичного счетчика. Результаты опыта для заданных схем двоично-десятичных СИ занести в таблицу 2. По таблицам состояний определить код, в котором работает каждый из двоично–десятичных счетчиков.

Таблица 2

	Состояния триггеров												
№ схемы													
N _x	Q ₄	Q ₃	Q ₂	Q ₁	Q ₄	Q ₃	Q ₂	Q ₁		Q ₄	Q ₃	Q ₂	Q ₁
0													
1													
2													
...													
14													
15													
Код													

2 Быстродействие счетчиков импульсов и методика экспериментального определения его параметров

Быстродействие счетчиков наряду с их емкостью (объемом) и видом выходного кода является одним из основных параметров, определяется оно двумя параметрами: разрешающей способностью t_p и временем установки $t_{уст}$ кода счетчика. Под разрешающей способностью t_p понимают минимально допустимый интервал времени между двумя входными импульсами, при котором не происходит потери счетных импульсов. Этот параметр часто выражают через максимальную частоту $f_{сч}$ счетных импульсов, определяемую из соотношения $f_{сч}=1/t_p$. Время установки кода $t_{уст}$ представляет собой интервал времени между моментом поступления

входного импульса и моментом установления выходного кода, т.е. моментом перехода счетчика в новое устойчивое состояние.

Максимальная частота счета $f_{сч}$ или разрешающая способность t_p важны тогда, когда результат счета импульсов необходимо получить после поступления на вход СИ серии (пачки) импульсов. Время установки кода $t_{уст}$ важно в том случае, когда результат счета необходимо получить после каждого приходящего счетного импульса.

Разрешающая способность t_p двоичных асинхронных СИ или их частота $f_{сч}$ определяется быстродействием первого триггера, соответствующего младшему разряду выходного кода, т.е. максимальной частотой или временем его переключения. Разрешающая способность t_p и $f_{сч}$ двоично-десятичных СИ определяется быстродействием триггеров, а также видом связей между разрядами счетчика и временем срабатывания логических схем, образующих связи между триггерами счетчика

Время установки кода двоичных асинхронных СИ зависит от числа разрядов счетчика, быстродействия триггеров счетчика, а также от значения устанавливаемого в счетчике кода. Максимальное значение $t_{уст}$ имеет место при изменении состояния всех разрядов, т.е. триггеров счетчика. В двоично-десятичных СИ еще одним фактором, увеличивающим $t_{уст}$, является время срабатывания логических схем, входящих в межразрядные связи счетчика.

В работе экспериментально определяют максимальную частоту счета $f_{сч}$ и по ней вычисляют разрешающую способность t_p счетчика. Максимальную частоту счета можно определить путем плавного повышения частоты входных импульсов до тех пор, пока СИ начинает давать сбои в счете импульсов. Граничная частота входных импульсов, при которой сбои не наблюдаются, т.е. при которой нет потери счетных импульсов, и будет максимальной частотой счета $f_{сч}$.

Для определения момента сбоя счетчика его исследуют в режиме делителя частоты. При отсутствии сбоев в счете коэффициент деления K_d счетчика (K_d – отношение частоты входных импульсов к частоте выходных импульсов СИ) будет равен его модулю счета или коэффициенту пересчёта. При появлении сбоев в счете коэффициент деления отличается

от модуля счета исследуемого СИ.

Коэффициент деления K_d счетчика определяют путем измерения отношения частоты входных импульсов к частоте выходных импульсов этого СИ с помощью цифрового частотомера.

Таким образом, методика измерения частоты $f_{сч}$ заключается в измерении коэффициента деления K_d счетчика при плавном повышении частоты входных импульсов и определении максимальной частоты, при которой K_d счетчика равен его модулю счета. Определенная таким образом частота входных импульсов является максимальной частотой счета $f_{сч}$ исследуемого счетчика.

Опыт 2. Экспериментальное определение быстродействия СИ

В опыте определяют максимальную частоту счета $f_{сч}$ для схем счетчиков, заданных руководителем.

1. Для выполнения опыта подключить выход внешнего генератора к разъему ВХОД макета.

2. Коэффициент деления K_d исследуемого СИ измеряют цифровым частотомером, который переводят в режим измерения отношения частот. При этом на вход цифрового частотомера, на который подается более высокая частота (которая является числителем измеряемого отношения частот), подать входные импульсы СИ, для чего указанный вход цифрового частотомера подключить к гнездам « $f_{вх}$ » макета. На вход цифрового частотомера с более низкой частотой (которая является знаменателем измеряемого отношения частот) подать выходные импульсы СИ, для чего этот вход частотомера подключить к гнездам « $f_{вых}$ » макета.

3. Включить внешний генератор и цифровой частотомер, дать им возможность прогреться, исследуемые счетчики импульсов перевести в режим непрерывного счета переключателем РЕЖИМ макета.

4. Переключателем макета № СХЕМЫ включить одну из заданных схем счетчика. Плавно повышать частоту входных импульсов счетчика, начиная примерно с 3 М Гц, с помощью ручек перестройки частоты генератора и следить за значением коэффициента деления K_d счетчика по цифровому частотомеру. При отсутствии сбоя в счете для

четырёхразрядного двоичного СИ $K_d=16$, а для декады двоично-десятичного счетчика $K_d=10$. Повышение частоты прекратить при появлении сбоев в счете т.е. при отклонении коэффициента деления K_d от значения, которое должно быть для соответствующего вида счетчика (при условии отсутствия сбоев в счете).

Уменьшить частоту входных импульсов настолько, чтобы сбои в счете для исследуемого счетчика прекратились, т.е. до того значения, при котором коэффициент деления станет равен исходному значению. Эта частота и будет являться максимальной частотой счета $f_{сч}$ исследуемого счетчика.

Измерить частоту $f_{сч}$ входных импульсов исследуемого СИ с помощью цифрового частотомера, переключив его в режим измерения частоты и занести ее значение в таблицу 3.

Таблица 3

№ схемы счётчика									
$f_{сч}$, МГц									
$1/f_{сч}=t_p$, нс									

5. Произвести измерение частоты $f_{сч}$ для всех схем СИ, заданных руководителем, соблюдая последовательность, изложенную в п. 4 (см. выше). Результаты измерений занести в таблицу 3.

6. По полученным значениям частоты $f_{сч}$ вычислить разрешающую способность t_p для всех схем счетчиков, исследуемых на быстродействие. Результаты вычислений t_p занести в таблицу 3.

Проанализировать полученные результаты для каждой схемы счетчика и сделать сравнительную оценку быстродействия различных счетчиков импульсов.

Опыт 3. Синтез и построение схемы дешифратора

В опыте синтезируют и строят схему дешифратора к одной из схем двоично-десятичного СИ для управления одним из цифровых индикаторов макета. Вид схемы СИ и тип ЦИ задает руководитель.

Дешифратор является комбинационной логической схемой, поэтому его синтез выполняется по правилам проектирования логических схем в

следующем порядке.

1. Составить таблицу истинности, которая должна содержать значения входных и выходных переменных дешифратора. В таблице должен быть отражен также способ кодирования чисел N_x .

Входными переменными дешифратора являются состояния триггеров $Q_1 - Q_4$ счетчика. Число возможных состояний двоичных переменных равно 16, и все эти состояния приведены в таблице 1 для суммирующего двоичного счётчика. Перенести их в таблицу истинности дешифратора. Способ кодирования чисел N_x представлен в таблице состояний триггеров для заданной схемы двоично-десятичного СИ, т.е. в столбцах таблицы 2, которые соответствуют схеме счетчика, заданной для построения дешифратора. Сравнивая кодовые комбинации табл. 2 для кодируемых чисел N_x с кодовыми комбинациями таблицы 1, в графу N_x таблиц истинности занести значения N_x , соответствующие кодовым комбинациям.

Выходными переменными дешифратора являются сигналы управления ЦИ, и их число определяется типом заданного ЦИ. При использовании индикатора типа ИВ число выходных переменных дешифратора равно 7, а для индикатора типа ИН – 10. При построении дешифратора к ЦИ типа ИН с разделением на группы четных и нечетных цифр число выходных переменных равно 5, а управление группой четных или нечетных цифр осуществляется сигналами с выхода триггера Q_1 .

Выходным переменным дешифратора присвоить значения 0 или 1 в зависимости от типа заданного ЦИ, а для ЦИ типа ИВ учитывать выбранный способ изображения цифр.

2. Произвести минимизацию схемы дешифратора, т.е. минимизация логических выражений для выходов дешифратора. Минимизацию осуществить с использованием карт Карно, с помощью которых составить минимизированные логические уравнения для всех выходов дешифратора. Преобразовать полученные уравнения к виду, удобному для реализации на элементной базе, примененной в макете: двух- и четырехходовые схемы И–НЕ. При этом следует учесть, какие необходимы сигналы для управления ЦИ: прямые (для ЦП типа ИВ) или инверсные (для ЦИ типа ИН).

3. По полученным уравнениям составить схему дешифратора и соб-

рать ее на макете. Прямые и инверсные выходы триггеров счетчиков выведены на соответствующие шины Q_i и \bar{Q}_i с гнездами. Управляющие входы цифровых индикаторов на макете пронумерованы: для ЦИ типа ИН – в соответствии с индицируемыми цифрами, для ЦИ типа, ИВ согласно расположению элементов этого индикатора на его графическом изображении на макете.

4. Произвести проверку функционирования дешифратора совместно с заданной схемой СИ и цифровым индикатором. При работе дешифратора на ЦИ типа ИВ включить его питание переключателем ПИТ. на макете. При использовании ЦИ типа ИН с разделением на группы четных и нечетных цифр переключатель S_1 макета включить. При построении дешифратора без деления на группы четных и нечетных цифр переключатель S_i отключить.

Переключателем № СХЕМЫ включить схему СИ, для которой синтезирован дешифратор, а переключателем РЕЖИМ установить режим подачи одиночных импульсов на вход СИ. Кнопкой СБРОС установить СИ в исходное (нулевое состояние). Подавая на вход СИ с помощью кнопки СЧЁТ одиночные импульсы, сравнить число входных импульсов с результатом счета на цифровом индикаторе.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены: схемы СИ, которые исследовались в работе; схема дешифратора, таблица истинности к нему и логические уравнения для его выходов; таблицы с результатами исследований и расчетов.

Контрольные вопросы

Назначение, разновидности и принципы построения СИ с различным модулем счета. Основные параметры СИ. Анализ работы СИ по заданной схеме и виду элементной базы. Быстродействие СИ и методика его экспериментального определения. Назначение, параметры и методика построения дешифраторов. Разновидности, параметры и сравнительная оценка цифровых индикаторов.

Литература

1. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных

устройствах. Энергоатомиздат, 1988.

2. Зубчук В.Н. и др. Справочник по цифровой схемотехнике. –К.: Техника, 1990, с.16-32, 112-189.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КОД-НАПРЯЖЕНИЕ

Цель работы:

1. Изучение устройства и принципа действия преобразователя код-напряжение (ПKN), методика расчёта параметров и экспериментальная проверка результатов расчёта.

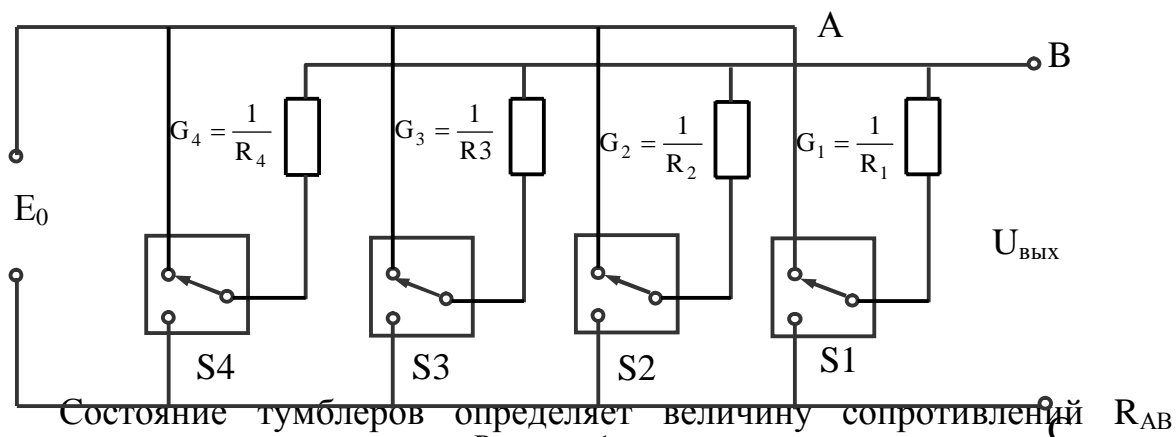
2. Изучение факторов, вызывающих погрешности, методика расчёта погрешностей и экспериментальная проверка результатов расчёта.

1. Принцип действия ПKN, методика расчёта параметров и экспериментальная проверка результатов расчёта

1.1 Описание макета ПKN

В работе используется четырёхразрядный ПKN, упрощённая схема которого показана на рисунке 1, а эквивалентная схема на – на рисунке 2а.

Преобразуемый код определяется состоянием тумблеров $S1...S4$. Нижнее положение тумблера является нулевым, а верхнее единичным (значащим).



показать, что выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ определяется кодом N_x , который задаётся состоянием тумблеров $S1 \dots S4$, т.е.

$$U_{\text{вых}} = \Delta U N_x,$$

где ΔU – величина ступени выходного напряжения $U_{\text{вых}}$.

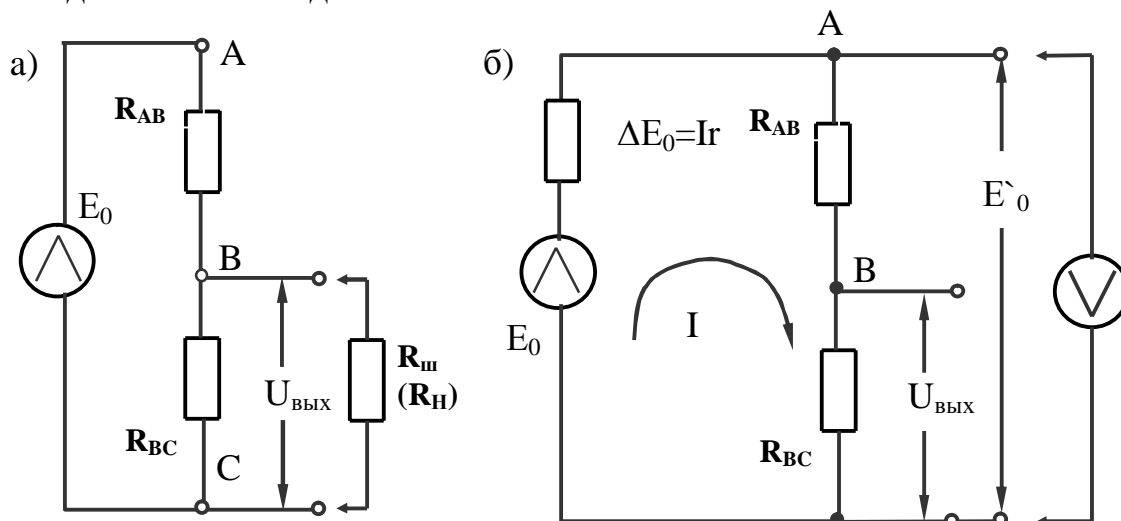
ПКН питается от источника E_0 с внутренним сопротивлением r (рис. 2б).

Для индикации значения кодируемого числа N_x в макете имеется цифровой индикатор, который управляется дешифратором. Дешифратор имеет 4 входа и 16 выходов, соответствующих всем возможным комбинациям состояний тумблеров. Входные сигналы на дешифратор подаются от вторых контактных пар тумблеров $S1 \dots S4$. На лицевую панель макета выведены 16 выходов дешифратора и 10 выходов от катодов, принадлежащих каждой из десяти цифр от 0 до 9 цифрового индикатора. Эти выходы следует определённым образом соединить между собой для получения схемы цифровой индикации.

Напряжение источника питания E_0 регулируется ручкой, выведенной на переднюю панель прибора, и устанавливается в соответствии с заданным значением.

1.2 Коды, используемые в работе

Четыре двоичных разряда ПКН используются как разряды декады двоично-десятичного кода.



Декада оперирует с десяти кодовыми комбинациями, остальные шесть не используются и являются факультативными (безразличными). В работе требуется по заданным номерам факультативных комбинаций

определить весовой код (веса разрядов), для чего составляется таблица кодовых комбинаций (таблица 1).

Образец таблицы 1

	N ₄ =6	N ₃ =2	N ₂ =2	N ₁ =1	Веса разрядов ← N _i		
№№ комби- наций	Q ₄	Q ₃	Q ₂	Q ₁	N _x	Кодируемые числа для фак-ных комбинаций	Задание E ₀ = 9,9В I _{max} = 1,8мА α = 0,25 r = 100 Ом
0	0	0	0	0	0		
1	0	0	0	1	1		
2	0	0	1	0		2	
3	0	0	1	1		3	
4	0	1	0	0	2		
5	0	1	0	1	3		Рассчитанные величины N _S =11 K _И =0,82 R _S =1375 Ом ΔU=0,9В
6	0	1	1	0	4		
7	0	1	1	1	5		
8	1	0	0	0	6		
9	1	0	0	1	7		
10	1	0	1	0		8	
11	1	0	1	1		9	
12	1	1	0	0	8		
13	1	1	0	1	9		
14	1	1	1	0		10	
15	1	1	1	1		11	
	R ₄ 2521	R ₃ 7563	R ₂ 7563	R ₁ 15125	Разрядные сопротивления ← R _i , Ом		

Пусть, например, заданы следующие номера факультативных кодовых комбинаций: 2-3-10-11-14-15. Остальные комбинации кодируют числа $N_x=0...9$. Так как используется взвешенный двоично-десятичный код, зная N_x , можно определить веса разрядов, поскольку кодируемое число N_x равно сумме весов значащих разрядов.

В работе используются различные весовые коды. Сумма весов разрядов может находиться в пределах от 9 (например, веса разрядов 2-4-2-1) до 15 (веса 8-4-2-1). Коды, в которых сумма весов разрядов равна 9, называются самодополняющимися кодами. Пример представления кодовых комбинаций и весов разрядов показаны в таблице 1.

1.3 Основные уравнения

1.3.1 Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$.

Сопротивления R_{AB} и R_{BC} для упрощения расчётов удобнее представлять в виде их проводимостей. При этом используем следующие обозначения.

G_s – сумма проводимостей всех сопротивлений $R_1 \dots R_4$, входящих в схему ПКН. Каждое из сопротивлений в зависимости от положения тумблера может включаться в состав плеча АВ или ВС. Суммарную проводимость плеча АВ (сумма проводимостей значащих разрядов) обозначим через G_x , т.е.

$$R_{AB} = \frac{1}{G_x} = \frac{1}{G_s a} = \frac{R_s}{a}; \quad (1)$$

где $a = \frac{G_x}{G_s}$. (2)

R_s – сопротивление, соответствующее суммарной проводимости G_s :

$$R_s = \frac{1}{G_s} \quad (3)$$

В плечо ВС будут включены проводимости, не вошедшие в состав плеча АВ, следовательно, проводимость плеча ВС будет равной $G_s - G_x$, т.е.

$$R_{BC} = \frac{1}{G_s - G_x} = \frac{1}{G_s(1-a)} = \frac{R_s}{1-a}. \quad (4)$$

На основании (1) и (4):

$$R_{AB} + R_{BC} = \frac{R_s}{a} + \frac{R_s}{(1-a)} = \frac{R_s}{a(1-a)}. \quad (5)$$

Напряжение $U_{\text{вых}}$ определится уравнением:

$$U_{\text{вых}} = \frac{E_0 R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC}} = E_0 a = E_0 \frac{G_x}{G_s}. \quad (6)$$

Веса проводимостей $G_1 \dots G_4$ выбираются в соответствии с весами кода. Тогда в случае использования взвешенного кода сумма проводимостей G_x , включённых в плечо АВ, может быть представлена в виде:

$$G_x = g_0 N_x; \quad (7)$$

где N_x - кодируемое число, равное сумме весов значащих разрядов;

$g_0 = \frac{1}{R_1}$ – единичная проводимость,

R_1 – сопротивление единичного разряда.

Аналогично:

$$G_S = g_0 N_S; R_1 = R_S N_S \quad (8)$$

где N_S – сумма весов всех разрядов.

Следовательно, уравнения (2) и (6) могут быть представлены в таком виде:

$$a = \frac{N_x}{N_S}; \quad (9)$$

$$U_{\text{вых}} = E_0 \frac{N_x}{N_S} = \Delta U N_x; \quad (10)$$

$$\Delta U = \frac{E_0}{N_S}; \quad (11)$$

где ΔU – величина ступени выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ при $N_x=1$.

Таким образом, напряжение $U_{\text{вых}}$ будет содержать число ступеней ΔU , равное величине, представленной преобразованным кодом N_x , т.е. будет выполняться преобразование кода N_x в выходное напряжение $U_{\text{вых}}$.

1.3.2 Сопротивление R_S

Величину R_S можно рассчитать, исходя из заданного максимального значения тока I_{max} источника питания ПКН.

Ток I источника согласно (5) определяется уравнением:

$$I = \frac{E_0}{R_{AB} + R_{BC}} = \frac{E_0 a(1-a)}{R_S}; \quad (12)$$

При изменении a в пределах $a=0...1$ ток I имеет максимум, положение которого можно определить приравняв нулю производную $\frac{dI}{da}$:

$$\frac{dI}{da} = E_0(1-2a) = 0.$$

Откуда следует, что максимум тока I_{max} наступает при $a=0,5$.
подставив $a=0,5$ в (12) получим:

$$I_{\max} = \frac{E_0}{4R_s}; \quad (13)$$

откуда согласно (8)

$$R_s = \frac{E_0}{4I_{\max}}; R_1 = \frac{E_0 N_s}{4I_{\max}} \quad (14)$$

1.3.3 Разрядные сопротивления

Разрядные сопротивления $R_1 \dots R_4$ можно выразить через веса соответствующих проводимостей $G_1 \dots G_4$. на основании (2) и (9) для любого сопротивления R_i и соответствующей ему проводимости $G_i = 1/R_i$

с весом N_i можно написать:

$$\frac{G_i}{G_s} = \frac{N_i}{N_s} = \frac{R_s}{R_i} = \frac{R_1}{N_s R_i}.$$

Откуда можно получить уравнение для расчёта любого разрядного сопротивления R_i , зная его вес N_i :

$$R_i = \frac{R_1}{N_i}. \quad (15)$$

1.3.4 Сопротивление шунта $R_{ш}$

Для подгонки величины ступени ΔU выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ к выходным зажимам ПКН подключают некоторое сопротивление, шунтирующее выход ПКН, называемое шунтом $R_{ш}$ (рисунок 2а). Подключение шунта вызывает уменьшение выходного напряжения до некоторой величины $U_{\text{выхш}}$, равной согласно (6) и (9)

$$U_{\text{выхш}} = \frac{E_0 G_x}{G_s + G_{ш}} = \frac{E_0 N_x}{N_s + N_{ш}}; \quad (16)$$

где $G_{ш} = \frac{1}{R_{ш}}$ - проводимость шунта;

$$N_{ш} = \frac{G_{ш}}{g_0} = \frac{R_s N_s}{R_{ш}} - \text{число, указывающее, какое количество единичных}$$

ступеней проводимости содержит $G_{ш}$. Уравнение получено с использованием (3) и (8).

Коэффициент шунтирования $K_{ш}$ можно определить, подставив значения $U_{вых}$ и $U_{выхш}$ в уравнение:

$$K_{ш} = \frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых}} = \frac{U_{вых} - U_{выхш}}{U_{вых}} = \frac{N_{ш}}{N_s + N_{ш}} = \frac{R_s}{R_{ш} + R_s},$$

откуда

$$R_{ш} = \frac{R_s(1 - K_{ш})}{K_{ш}}. \quad (17)$$

При включении шунта пропорционально снижению напряжения $U_{вых}$ уменьшается также величина ступени выходного напряжения, новое значение которой определяется уравнением:

$$\Delta U_{ш} = \frac{E_0}{N_s + N_{ш}}. \quad (18)$$

Ступень $\Delta U_{ш} < \Delta U$, так как при включении шунта число ступеней напряжения больше на величину $N_{ш}$.

Шунтирующее действие, уменьшающее величину напряжения $U_{вых}$, оказывает любое нагрузочное сопротивление R_H , подключённое к выходу ПКН (например, измеритель выходного напряжения, приёмник выходного аналогового напряжения ПКН и т.п.). Это обстоятельство следует иметь в виду при проектировании устройства содержащего ПКН.

1.3.5 Коэффициент использования напряжения источника питания $K_{и}$.

Коэффициент $K_{и}$ определяется отношением номинального выходного напряжения $U_{выхн}$ к напряжению источника питания E_0 :

$$K_{и} = \frac{U_{выхн}}{E_0} = \frac{N_{хн}}{N_s} \quad (19)$$

так как, согласно (9)

$$U_{выхн} = E_0 \frac{N_{хн}}{N_s}.$$

Можно видеть, что $K_{и} < 1$ в случае, если $N_{хн} < N_s$. Например, при использовании весового кода 8-4-2-1 величина $N_s = 15$, а номинальное значение декады $N_{хн} = 9$, тогда

$$K_{\text{и}} = \frac{U_{\text{выхн}}}{E_0} = \frac{N_{\text{хн}}}{N_{\text{с}}} = \frac{9}{15} = 0,6.$$

При использовании самодополняющихся кодов, у которых $N_{\text{с}}=9$, коэффициент $K_{\text{и}}=1$.

При наличии шунта

$$U_{\text{выхн}} = \frac{E_0 G_{\text{хн}}}{G_{\text{с}} + G_{\text{ш}}} = \frac{E_0 N_{\text{хн}}}{N_{\text{с}} + N_{\text{ш}}}. \quad (20)$$

В этом случае

$$K_{\text{и}} = \frac{N_{\text{хн}}}{N_{\text{с}} + N_{\text{ш}}}. \quad (21)$$

Следовательно, включение шунта, уменьшает $K_{\text{и}}$ за счёт уменьшения величины ступени выходного напряжения ΔU .

Опыт 1. Определение весов разрядов и сборка схемы цифрового индикатора

1. Внести в таблицу 1 исходные данные заданного преподавателем варианта. Образец таблицы 1 приводится в данных методических указаниях.

2. Внести в таблицу 1 все 16 возможных комбинаций четырёх-разрядного двоичного кода.

3. Отметить штриховкой факультативные комбинации, номера которых даны в заданном варианте. Остальным комбинациям присвоить кодируемые числа $N_{\text{х}}=0\dots 9$ в порядке возрастания номеров комбинаций (номера комбинаций даны в левой колонке таблицы 1).

4. Определить веса $N_1\dots N_4$ разрядов $Q_1\dots Q_4$, считая, что кодируемое число $N_{\text{х}}$ равно сумме весов значащих разрядов, и определить сумму весов $N_{\text{с}}$ всех разрядов. Полученные величины $N_1\dots N_4$ и $N_{\text{с}}$ внести в таблицу 1.

5. Рассчитать коэффициент использования напряжения источника питания $K_{\text{и}}$ по формуле (19). Рассчитанное значение внести в таблицу 1.

6. Определить кодируемые числа для факультативных комбинаций и внести их в таблицу 1 (эти числа могут находиться в пределах от 0 до 15).

7. Исходя из данных, полученных в таблице 1, соединить выходы дешифратора с катодами соответствующих цифр цифрового индикатора,

включая также выходы факультативных комбинаций, если кодируемое число для этих комбинаций меньше 10. Проверить работу цифрового индикатора, набирая различные комбинации с помощью тумблеров $S_1...S_4$.

Опыт 2. Расчёт разрядных сопротивлений и сборка схемы ПКН

1. По заданным значениям E_0 и I_{\max} рассчитать сопротивление R_s , обратное суммарной проводимости G_s всех разрядов $R_s = \frac{1}{G_s}$ и сопротивление единичного разряда R_1 по формуле (14) и полученные значения внести в таблицу 1.

2. Рассчитать значения разрядных сопротивлений $R_2...R_4$ по формуле (15), где N_i – вес рассчитываемого разрядного сопротивления R_i . Полученные значения R_i внести в таблицу 1.

3. Рассчитать величину ступени выходного напряжения ΔU по формуле (11) и полученное значение внести в табл. 1.

4. Набрать на магазинах сопротивления вычисленные значения $R_1...R_4$, магазины подключить к схеме ПКН согласно схеме рисунка 1 (младший разряд R_1 располагается справа).

5. Установить ручкой, расположенной на макете, заданное напряжение источника питания E_0 , проверить соответствие выходного напряжения ПКН задаваемым кодовым комбинациям тумблеров $S_1..S_4$, исходя из рассчитанной ступени ΔU выходного напряжения.

Опыт 3. Исследование линейности характеристики ПКН

1. В таблицу 2 внести все 10 рабочих кодовых комбинаций (без факультативных) и их кодируемые числа N_x .

2. Последовательно набирая эти комбинации, измерить выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ при всех комбинациях, результаты измерений внести в таблицу 2.

Таблица 2

Измерения без шунта				Измерения с шунтом		
Кодовые комбинации	N_x	$U_{\text{вых}}$	ΔU	$U_{\text{выхш}}$	$\Delta U_{\text{ш}}$	$\frac{\Delta U_{\text{ш}}}{U_{\text{ш}}}$
0 – 0 – 0 – 0	0	0	—	0	—	—
0 – 0 – 0 – 1	1					
.....
						...
1 – 1 – 0 – 1	9					
$K_{\text{нл}} = \underline{\hspace{2cm}}$.				$R_{\text{ш}} = \underline{\hspace{2cm}}$ Ом; $K_{\text{нлш}} = \underline{\hspace{2cm}}$.		

3. Определить приращение ΔU напряжения $U_{\text{вых}}$ при каждой новой комбинации, т.е. величину ступени выходного напряжения:

$$\Delta U_i = U_i - U_{i-1}$$

Полученные значения ΔU_i внести в таблицу 2.

4. Вычислить коэффициент нелинейности характеристики ПКН по формуле:

$$K_{\text{нл}} = \frac{\Delta U_{\text{max}}}{\Delta U_{\text{min}}} ;$$

где ΔU_{max} и ΔU_{min} наибольшая и наименьшая величина ступени выходного напряжения.

Идеально линейная характеристика будет при $K_{\text{нл}}=1$, когда все ступени одинаковые.

Опыт 4. Исследование влияния шунта и других нагрузочных элементов на выходное напряжение ПКН

Опыт выполняется в такой последовательности:

1. Рассчитать сопротивление шунта $R_{\text{ш}}$ для коэффициента шунтирования $K_{\text{ш}}=0,2$ по формуле (17) и результат расчёта внести в таблицу 2.

2. Подключить магазин сопротивления к выходу ПКН, на котором набрать рассчитанное сопротивление $R_{ш}$.

3. Повторить опыт 3 для ПКН с шунтом, измерить $U_{выхш}$ при всех значениях N_x и рассчитать по этим данным $\Delta U_{ш}$ и коэффициент нелинейности $K_{нлш}$. Значения $\Delta U_{ш}$ и $K_{нлш}$ рассчитать по формулам, соответственно:

$$\Delta U_{ш} = U_{выхi} - U_{вых(i-1)};$$

$$K_{нл} = \frac{\Delta U_{ш \max}}{\Delta U_{ш \min}}.$$

4. Проверить постоянство отношения $\frac{\Delta U_{ш}}{\Delta U}$, рассчитать его для всех N_x , результаты расчёта внести в таблицу 2. Значения ΔU взять из опыта 3.

5. На основании полученных данных в одних координатных осях построить графики зависимостей $U_{вых}$ от N_x для ПКН с шунтом и без шунта.

1 Исследование факторов, вызывающих погрешности, методика расчёта погрешностей, экспериментальная проверка результатов расчёта

2.1 Анализ погрешностей ПКН

Для определения всех факторов, которые вызывают погрешности, используем уравнение для ПКН с шунтом (16), которое прологарифмируем, а затем продифференцируем по переменным N_x , N_s и $N_{ш}$. Считая приращения переменных малыми, заменим дифференциалы конечными приращениями. В результате получим уравнение относительной погрешности $\delta_{ПКН}$:

$$\delta_{ПКН} = \frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых}} = \frac{\Delta E_0}{E_0} + \frac{\Delta N_x}{N_x} - \frac{\Delta N_s}{N_s + N_{ш}} - \frac{\Delta N_{ш}}{N_s + N_{ш}}. \quad (22)$$

Параметры N_x , N_s и $N_{ш}$ определим относительно единичной проводимости g_0 , которую будем считать постоянной:

$$N_x = \frac{G_x}{g_0}; \quad N_s = \frac{G_s}{g_0}; \quad N_{ш} = \frac{G_{ш}}{g_0}. \quad (22a)$$

Таким образом, нестабильность проводимостей G_x , G_S и $G_{ш}$ будет определяться приращениями значений N_x , N_S и $N_{ш}$, которые при этом условии следует считать переменными.

Разделим погрешности в уравнении (22) на основании принципа суперпозиции погрешностей [2], состоящего в том, что результирующая погрешность есть сумма отдельных составляющих, причём каждая составляющая может вычисляться при условии, что остальные погрешности равны нулю. Рассмотрим составляющие погрешности $\delta_{ПКН}$, полученные на этом основании.

2.2 Погрешность от нестабильности напряжения E_0

Погрешность δ_E определяется первым слагаемым уравнения (22) :

$$\delta_E = \frac{\Delta E_0}{E_0} = \frac{E_0 - E'_0}{E_0}. \quad (23)$$

где E'_0 – новое значение напряжения E_0 в результате воздействия дестабилизирующего фактора.

Погрешность может возникать из-за нестабильности напряжения источника E_0 , а также в результате падения напряжения $\Delta E = I_r$ на внутреннем сопротивлении r источника E_0 из-за проходящего тока I (рисунок 2б).

2.3 Погрешность $\delta_{ш}$ от нестабильности сопротивления шунта или внешней нагрузки.

Погрешность $\delta_{ш}$ определится последним слагаемым уравнения (22), преобразованным на основании (22а):

$$\delta_{ш} = -\frac{\Delta N_{ш}}{N_S + N_{ш}} = \frac{\alpha_{ш} R_S}{R_{ш} + R_S},$$

где $\alpha_{ш} = \frac{\Delta G_{ш}}{G_{ш}} = \frac{\Delta N_{ш}}{N_{ш}}$ – коэффициент нестабильности проводимости шунта (или внешней нагрузки).

Дестабилизирующим фактором, который вызывает погрешность $\delta_{ш}$, является приращение проводимости шунта $\Delta G_{ш}$. В этом случае приращение выходного напряжения $\Delta U_{вых}$ будет такое же, как при подключении шунта с проводимостью $\Delta G_{ш}$. Погрешность $\delta_{ш}$ в данной работе не анализируется, так как влияние шунта подробно исследовалось в

опыте 4, с другой стороны эта погрешность мала и ею можно пренебречь, поскольку обычно $R_S \ll R_{ш}$.

2.4 Погрешность δ_R от нестабильности разрядных сопротивлений

Погрешность δ_R определяется вторым и третьим слагаемым уравнения (22):

$$\delta_R = \frac{\Delta N_x}{N_x} - \frac{\Delta N_S}{N_S + N_{ш}}. \quad (24)$$

Так как одни и те же разрядные сопротивления могут входить в одно или оба слагаемых в уравнении (24), эти составляющие являются коррелированными и поэтому должны учитываться с их знаками.

Уравнение (24) относится к ПКН с шунтом. Если шунт отсутствует, следует положить $N_{ш}=0$, тогда

$$\delta_R = \frac{\Delta N_x}{N_x} - \frac{\Delta N_S}{N_S}. \quad (25)$$

Погрешность δ_R возникает из-за собственной нестабильности разрядных сопротивлений (например, от изменения температуры), а также по причине непостоянства сопротивлений бесконтактных ключей, которые коммутируют разрядные сопротивления. Влияние этих факторов зависит от кодовой комбинации преобразуемого N_x .

Опыт 5. Исследование погрешности от влияния внутреннего сопротивления источника питания

При наличии внутреннего сопротивления r источника напряжения E_0 (рисунок 2б) на этом сопротивлении возникает падение напряжения $\Delta E = Ir$, поэтому на схему ПКН будет воздействовать меньшее напряжение $E'_0 = E_0 - \Delta E$, что приведёт к погрешности определяемой уравнением (23).

Подставив в (23) $\Delta E = Ir$, и используя (10), получим:

$$\delta_E = \frac{Ir}{E_0} = \frac{r}{R_S} a(1-a) = \frac{r}{R_S} \frac{N_x(N_S - N_x)}{N_S^2} = DN_x(N_S - N_x), \quad (26)$$

где $D = \frac{r}{R_S N_S^2}$ – обозначение для сокращения записи и вычислений. (27)

Максимальная погрешность $\delta_{E_{\max}}$ будет при $I = I_{\max}$ и согласно (13) её величину выразим уравнением:

$$\delta_{E_{\max}} = \frac{I_{\max} r_0}{E_0} = \frac{E_0 r}{4R_s}. \quad (28)$$

Опыт выполняется в такой последовательности:

1. Для уменьшения объема вычислительной и экспериментальной работы в таблицу 3 занести только нечетные значения N_x и соответствующие кодовые комбинации из таблицы 2.

2. В нижнюю часть таблицы 3 переписать из табл.1 значения E_0 , N_s , R_s и r , а также внести величины D и $\delta_{E_{\max}}$, вычисленные соответственно по формулам (27) и (28).

3. Вычислить и записать в соответствующие колонки значения $N_s - N_x$, $N_x(N_s - N_x)$ и величину δ_E , определённую согласно (26) по формуле:

$$\delta_E = DN_x(N_s - N_x).$$

4. Включить с помощью кнопочного переключателя заданное значение r и проверить установку заданного напряжения E_0 , подключив вольтметр к выходным зажимам источника.

5. Вольтметр подключить к выводам АС, как показано на схеме рисунка 2б.

6. Измерить вольтметром напряжение E'_0 и результат внести в таблицу 3.

7. Вычислить погрешность $\delta_{EЭ}$ на основании данных эксперимента по формуле (23) и сравнить с теоретическим значением δ_E . Значение $\delta_{EЭ}$ внести в таблицу 3.

8. Начертить график зависимости расчётной погрешности δ_E на участке от $N_x = 0$ до $N_x = N_s$, принимая во внимание, что при $N_x = N_s$ погрешность $\delta_E = 0$. На полученный график нанести значения $\delta_{EЭ}$, полученные на основании экспериментальных данных. График показать преподавателю.

Таблица 3

Кодов. комб.	N_x	Расчётная часть			Экспериментальная часть		
		$N_S - N_x$	$N_x(N_S - N_x)$	$\delta_E = DN_x(N_S - N_x)$	E'_0	$E_0 - E'_0, В$	$\delta_{EЭ}$
0-0-0-0	0						
0-0-0-1	1						
.....
1-1-0-1	9						
$E_0 = \text{_____ В}; \quad R_S = \text{_____ Ом}; \quad D = \text{_____};$ $N_S = \text{_____}; \quad r = \text{_____ Ом}; \quad \delta_{E\max} = \text{_____}.$							

**Опыт 6. Исследование погрешности от нестабильности
разрядных сопротивлений**

Пусть известна относительная нестабильность α_i некоторого разрядного сопротивления R_i , имеющего проводимость $G_i = \frac{1}{R_i}$, где индекс i обозначает номер разряда

$$\alpha_i = \frac{\Delta G_i}{G_i} = \frac{\Delta N_i}{N_i}$$

откуда

$$\Delta N_i = \alpha_i N_i. \quad (29)$$

Погрешность δ_R от нестабильности разрядных сопротивлений для ПКН без шунта определяется уравнением (25):

$$\delta_R = \frac{\Delta N_x}{N_x} - \frac{\Delta N_S}{N_S}, \quad (30)$$

где ΔN_S – сумма приращений весов всех разрядов ПКН согласно (29):

$$\Delta N_S = \Delta N_4 + \Delta N_3 + \Delta N_2 + \Delta N_1 = \alpha_4 N_4 + \alpha_3 N_3 + \alpha_2 N_2 + \alpha_1 N_1,$$

ΔN_x – сумма приращений весов значащих разрядов (сопротивления этих разрядов включены в плечо АВ схемы ПКН рисунок 1 и рисунок 2а):

$$\Delta N_x = \sum \Delta N_{xi} = \sum \alpha_i N_{xi}.$$

Нетрудно видеть, что в уравнении (30) первое слагаемое зависит от кодовой комбинации N_x , а второе – постоянная величина.

Уравнение (30) простое по структуре, но несколько громоздко для использования. Чтобы упростить расчёты в работе ставится задача определения погрешности для всех значений N_x , при допущении, что заданная нестабильность α_i существует только в одном разряде, а в остальных равна нулю.

Тогда уравнение (30) упростится:

$$\delta_R = \frac{\alpha_i N_i}{N_x} - \frac{\alpha_i N_i}{N_S}, \quad (31)$$

где N_i – вес разряда, в котором проводимость из-за дестабилизирующих факторов получает приращение, определяемое коэффициентом α_i согласно уравнению (29).

Индекс i при N_i и α_i указывает на номер разряда Q_4 , Q_3 , Q_2 или Q_1 (см. табл.1). В уравнении (31) первое слагаемое существует только для комбинаций, где i -тый разряд является значащим, а второе – при всех комбинациях. Методику расчёта погрешности δ_R в процессе выполнения данного опыта, поясним с помощью исходных данных того же примера, который использовался, как образец в таблице 1.

Опыт выполняется в такой последовательности:

1. В колонки 1 и 2 таблицы 4 переписать кодовые комбинации и кодируемые числа N_x из таблицы 3.

2. В рассматриваемом примере $\alpha_2=0,25$. Это означает, как следует из номера индекса, что приращение проводимости вводится во второй разряд, поэтому в таблице 4 следует записать параметры второго разряда N_2 , R_2 , α_2 и величину N_S из таблицы 1:

$N_2=2$ – вес проводимости второго разряда;

$R_2=7563$ Ом – величина разрядного сопротивления;

$\alpha_2=0,25$ – коэффициент нестабильности проводимости G_2 ;

$N_S=11$ – сумма всех разрядов.

Необходимо также принять во внимание, что второй разряд является

значащим при $N_x=4$ и $N_x=5$. Поэтому требуется вычислить величину $\frac{\alpha_i N_i}{N_x}$ для этих значений N_x и результаты разместить в строках колонки 3, где $N_x=4$ и $N_x=5$.

3. Рассчитать величину $\frac{\alpha_i N_i}{N_x}$ и результат разместить во всех строках колонки 4.

4. Вычислить погрешность δ_R путём суммирования значений колонок 3 и 4 с учётом их знаков и результаты разместить в колонке 5.

5. Провести экспериментальную проверку расчёта δ_R . Для этого клавишным переключателем включить внутреннее сопротивление источника $r = 0$. Измерить или переписать из таблицы 2 значение $U_{\text{вых}}$ для всех значений N_x .

6. Ввести заданную величину $\alpha_2=0,25$ во второй разряд путём уменьшения сопротивления магазина $R_2=7563$ до значения R'_2 , величину которого необходимо вычислить. Вычисление выполняется исходя из уравнения:

$$\alpha_2 = \frac{\Delta G_2}{G_2} = \frac{G'_2 - G_2}{G_2} = \frac{R_2 - R'_2}{R'_2},$$

где $R_2 = \frac{1}{G_2}$; $R'_2 = \frac{1}{G'_2}$.

откуда

$$R'_2 = \frac{R_2}{1 + \alpha_2} = 6050 \text{ Ом.}$$

В общем случае новое значение R'_i сопротивления R_i определяется из уравнения:

$$R'_i = \frac{R_i}{1 + \alpha_i}.$$

Величину R'_i внести в нижнюю часть таблицы 4.

7. Измерить величину напряжения $U'_{\text{вых}}$ при $R_i=R'_i$ для всех значений N_x . Вычислить значение $\delta_{R\Omega}$ по результатам эксперимента из

уравнения:

$$\delta_{RЭ} = \frac{U_{\text{ВЫХ}} - U'_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}}.$$

Занести в таблицу 4 величины $U'_{\text{ВЫХ}}$, $U_{\text{ВЫХ}} - U'_{\text{ВЫХ}}$ и $\delta_{RЭ}$.

8. По результатам вычислений δ_R (колонка 5, таблица 4) построить график зависимости δ_R от N_x . На этот график нанести точки для $\delta_{RЭ}$, полученные экспериментально (колонка 9, таблица 4) и результаты показать преподавателю.

Таблицы 4

Расчётная часть					Экспериментальная часть			
Кодов. комб.	N_x	$\frac{\alpha_2 N_2}{N_x}$	$-\frac{\alpha_2 N_2}{N_s}$	δ_R	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$	$U'_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$	$U_{\text{ВЫХ}} - U'_{\text{ВЫХ}}, \text{В}$	$\delta_{RЭ}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0 0 0 0	0	-	-	-	-	-	-	-
0 0 0 1	1	0	-0,045	-0,045				
0 1 0 0	2	0	-0,045	-0,045				
0 1 0 1	3	0	-0,045	-0,045				
0 1 1 0	4	0,125	-0,045	+0,080				
0 1 1 1	5	0,100	-0,045	+0,055				
1 0 0 0	6	0	-0,045	-0,045				
1 0 0 1	7	0	-0,045	-0,045				
1 1 0 0	8	0	-0,045	-0,045				
1 1 0 1	9	0	-0,045	-0,045				
$\alpha_2 = 0,25;$ $N_2 = 2;$					$\alpha_2 N_2 = 0,5;$ $N_s = 11;$ $R_2 = 7563 \text{ Ом};$ $R'_2 = 6050 \text{ Ом}.$			

Содержание отчёта

В отчёте предоставить таблицы 1–4 с результатами экспериментов, схему ПКН, схему испытания погрешности от внутреннего сопротивления источник и график зависимости погрешности от входного кода, а также

график погрешности от нестабильности разрядных сопротивлений.

Контрольные вопросы

Принцип работы ПКП. Выбор разрядных сопротивлений (проводимостей). Погрешность ПКП. Характер зависимости погрешности от внутреннего сопротивления источника питания. Зависимость погрешности от разрядного сопротивления. Определение от весового кода ПКН. Способ формирования равномерно–ступенчатого напряжения. Назначение шунта.

Литература:

1. Б.И. Швецкий, Электронные цифровые приборы, Киев, «Техника», 1991г.
2. А.А. Горлач, М.Я. Минц, В.Н. Чинков, Цифровая обработка сигналов в измерительной технике, Киев, «Техника», 1985г.

Варианты заданий

№ заданий	Номера факультативных комбинаций	E_0 , В	I_{\max} , мА	α_i	r , Ом
1	6 – 7 – 12 – 13 – 14 – 15	10,4	1,5	$\alpha_4=0,1$	200
2	8 – 9 – 10 – 13 – 14 – 15	10,8	2,0	$\alpha_4=0,15$	150
3	7 – 11 – 12 – 13 – 14 – 15	9,8	1,6	$\alpha_3=0,15$	100
4	4 – 5 – 6 – 7 – 14 – 15	9,9	1,6	$\alpha_4=0,2$	50
5	4 – 8 – 9 – 10 – 11 – 15	10,0	1,4	$\alpha_3=0,2$	200
6	2 – 3 – 6 – 7 – 12 – 13	9,9	1,5	$\alpha_2=0,3$	150
7	8 – 9 – 12 – 13 – 14 – 15	9,75	1,8	$\alpha_2=0,15$	100
8	5 – 6 – 7 – 13 – 14 – 15	10,2	1,5	$\alpha_4=0,1$	50
9	2 – 3 – 8 – 9 – 12 – 13	9,9	1,8	$\alpha_2=0,3$	200

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ПОРАЗРЯДНОГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ

Цель работы: ознакомление с устройством, принципом действия, эксплуатационными характеристиками цифрового омметра типа ЕБ–5 и аналого–цифрового преобразователя (АЦП) поразрядного кодирования.

1 Изучение принципа действия цифрового килоомметра поразрядного кодирования

В работе исследуется цифровой омметр ЕБ–5, построенный по схеме моста, в котором схема управления и коммутация элементов измерительной схемы выполнены с помощью реле. В современных цифровых мостах схема управления, а в ряде случаев и измерительная схема выполнены на бесконтактных интегральных элементах, но принцип уравнивания остается тот же. Так как релейная схема удобна для наблюдения каждого шага уравнивания, в работе используется килоомметр ЕБ–5, однако принцип работы омметра поразрядного кодирования поясняется с помощью эквивалентной схемы (см. рисунок), построенной на современной элементной базе.

Измерительная схема цифрового омметра представляет собой четырехплечный мост, образованный сопротивлениями R_x , R_0 , R_1 и R_2 (см. рисунок). Уравнивающее плечо R_2 выполнено в виде четырех декад, каждая из которых состоит из параллельно включаемых резисторов с проводимостями G_{44} , G_{34} , G_{24} , G_{14} , величины которых находятся в соотношении 2–4–2–1.

На рисунке приставки в обозначениях проводимостей, ключей и триггеров декад индексы указывают: 1–я цифра – номер разряда в декаде, 2–я цифра – номер декады.

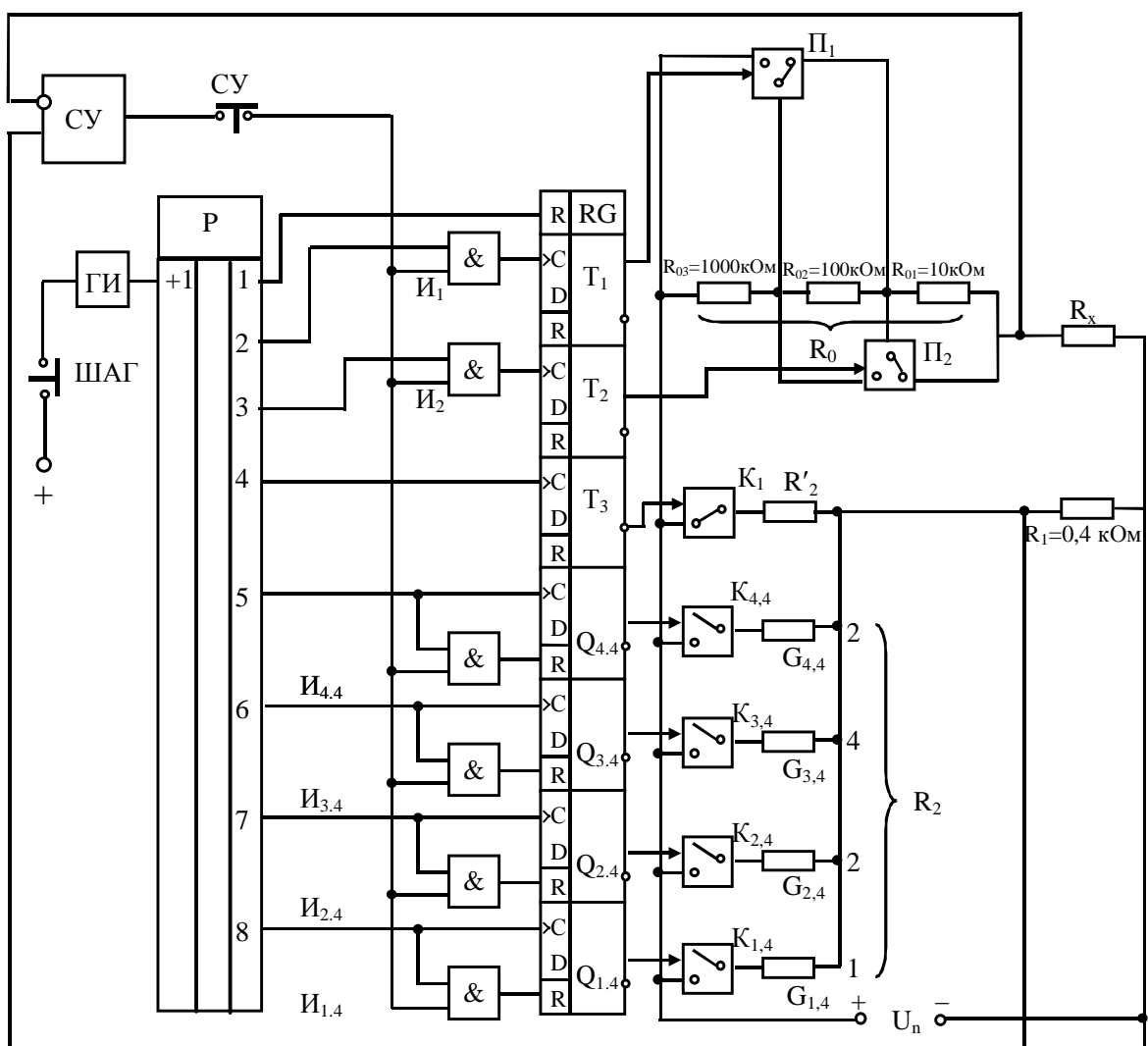


Рисунок – Схема цифрового омметра

Величины проводимостей каждой декады отличаются от предыдущей декады в 10 раз. За единицу проводимости в младшей декаде принята проводимость $G_{11} = G_0 = 0,25 \cdot 10^{-6}$ сим.

Схема управления цифрового омметра состоит из распределителя Р, регистра RG, образованного триггерами T_1 – T_3 , Q_{44} – Q_{11} , и схем совпадения $И_1$, $И_2$, $И_{44}$ – $И_{11}$. Триггеры регистра RG представляют собой D–триггеры с динамическим управлением. На их D–входы подан уровень логической 1 (на схеме не показано), поэтому в состояние 1 они устанавливаются по фронту импульса на С–входе.

Процесс измерения начинается с выбора предела измерения, что сводится к выбору величины сопротивления плеча R_0 . Величина сопротивления плеча должна быть выбрана так, чтобы при уравнивании моста были использованы все декады проводимостей

переменного плеча R_2 моста. Точность измерения в этом случае будет максимальной, так как погрешность квантования будет минимальной.

В режиме выбора предела измерения вместо переменного плеча R_2 моста, образованного проводимостями $G_{44}-G_{11}$, включается постоянное сопротивление R'_2 . Проводимость резистора R'_2 составляет десятую часть суммы проводимостей всех декад, т.е. максимальной проводимости уравнивающего (компенсирующего) плеча:

$$R'_2 = \frac{1}{0,1} \sum_{i,j=1}^{i,j=4} G_{ij} = \frac{1}{0,1} G_{k \max}.$$

Прибор Е6-5 имеет три предела измерения, которые выбираются автоматически: 1 предел – 10 кОм; 2 предел – 100 кОм; 3 предел – 1000 кОм. Для каждого из этих пределов измерения сопротивление плеча R_0 имеет соответственно величину $R_{01} = 10$ кОм, $R_{02} = 100$ кОм, $R_{03} = 1$ МОм. В приборе выбор пределов измерения производится как отработка сверху, т.е. начиная со старшего предела.

Рассмотрим процесс автоматического выбора пределов измерения. При первом импульсе, поступившем с ГИ на вход распределителя Р, появится напряжение на выходе 1 распределителя. Импульс с выхода 1 пройдет на общий R-вход регистра RG и все триггеры (T_1-T_3 , $Q_{44}-Q_{11}$), перейдут в исходное (нулевое) состояние. При этом все проводимости в плече R_2 отключатся, а сигналом с инверсного выхода триггера T_3 с помощью ключа K_1 в плечо R_2 моста включится резистор R'_2 на время выбора предела измерения. В плечо R_0 моста с помощью переключателей Π_1 и Π_2 будет включено сопротивление $R_{03} = 1$ МОм, что соответствует третьему пределу измерения. На рисунке состояния ключей и переключателей Π_1 и Π_2 показаны для случая нулевого состояния триггеров регистра.

Состояние моста при каждом такте (шаге) оценивается сравнивающим устройством (СУ). При $R_x > 100$ кОм после 1 шага мост будет в состоянии недокомпенсации, а СУ будет в состоянии 0. Поэтому при втором и третьем шагах импульсы будут появляться на 2 и 3-м выходах распределителя, а на выходах схем I_1 и I_2 будет нулевой уровень. Состояние триггеров T_1 и T_2 не изменится, поэтому в плече R_0

останется включенным сопротивление $R_{03}=1$ МОм, соответствующее третьему пределу измерения.

Если $R_x < 100$ кОм, – то после 1 шага в схеме моста будет перекомпенсация, и СУ будет в состоянии 1. При втором шаге импульс с выхода 2 распределителя пройдет через схему И₁, так как на ее втором входе будет уровень 1 с выхода СУ, и по С – входу установит триггер Т₁ в состояние 1. При этом переключатель П₁ изменит свое положение, и в плече R₀ будет включено сопротивление $R_{02} = 100$ кОм, что соответствует второму пределу измерения. При третьем шаге аналогично происходит процесс выбора первого предела. Третьим шагом заканчивается процесс выбора предела измерения. Состояния триггеров Т₁ и Т₂ являются входными переменными дешифратора, управляющего положением запятой на цифровом отсчётном устройстве ЦОУ (на схеме не показано).

В четвертом такте триггер Т₃ устанавливается в состояние 1, и в уравнивающем плече отключается резистор R'₂. Схема подготовлена к уравниванию измеряемого сопротивления.

В процессе уравнивания моста используются триггеры регистра Q₄₄-Q₁₁.

Уравнивание моста производится следующим образом. При поступлении 5–го импульса с ГИ появляется импульс на 5–м выходе распределителя Р, фронт которого устанавливает триггер Q₄₄ в состояние 1. При этом ключ К₄₄ замыкается, и в плечо R₂ моста включается проводимость G₄₄. При перекомпенсации на выходе СУ будет уровень 1, который через схему И₄₄ по R–входу установит триггер Q₄₄ в нулевое состояние. При этом G₄₄ вызвавшая перекомпенсацию, отключится.

При недокомпенсации на выходе СУ будет уровень 0, триггер Q₄₄ останется в состоянии 1, и проводимость G₄₄ останется включенной в плечо R₂. В последующих тактах поочередно устанавливаются в состояние 1 триггеры Q₃₄– Q₁₁, и подключаются проводимости всех разрядов всех декад. При каждом такте СУ определяет состояние моста, и проводимость, вызвавшая перекомпенсацию, отключается.

По окончании процесса уравнивания мост будет в состоянии равновесия, а состояния триггеров Q₄₄ – Q₁₁ составят определенную

кодovou комбинацию в зависимости от величины измеряемого сопротивления R_x .

Из условия равновесия моста сопротивление R_x пропорционально сумме проводимостей, которые остались включенными по окончании процесса уравнивания:

$$R_x = R_0 R_1 \sum G_{ij} = R_0 R_1 G_0 N_x,$$

где N_x – число ступеней квантования, при которых мост находится в равновесии.

Число N_x представлено двоично–десятичным кодом в виде состояний триггеров $Q_{44} - Q_{11}$, и является цифровым эквивалентом измеряемого сопротивления R_x . Это число через дешифратор индицируется на цифровом отсчетном устройстве (на схеме не показало).

2 Приставка для наблюдения процесса измерения в килоомметре

Цикл измерения в килоомметре Еб–5 длится 2,5 – 3 с, поэтому проследить весь процесс невозможно. Для наблюдения процесса измерения, происходящего в приборе, служит приставка. Приставка позволяет последовательно шаг за шагом: просмотреть весь цикл измерения, иллюстрируя коммутации основных цепей в приборе при каждом шаге.

На лицевой панели приставки упрощенно изображены основные элементы схемы килоомметра и расположены органы управления приставкой и килоомметром при работе его в неавтоматическом режиме. Назначение органов управления следующее.

1. Тумблер ПРИСТАВКА предназначен для включения или отключения приставки от килоомметра. При установке тумблера в положение ОТКЛ. приставка отключается от прибора и управление его работой осуществляется кнопкой ЗАПУСК на лицевой панели прибора, т.е. прибор работает в автоматическом режиме. При установке тумблера в положение ВКЛ приставка включается, и управление работой прибора осуществляется органами управления, расположенными на лицевой панели приставки, т.е. прибор переводится в неавтоматический (ручной) режим работы.

2. Кнопка и лампочка СИНХРОНИЗАЦИЯ. Кнопка предназначена для установки приставки и килоомметра в исходное синхронное положение перед началом цикла измерения. При нажатии этой кнопки по окончании синхронизации загорается лампочка СИНХРОНИЗАЦИЯ.

3. Кнопка ШАГ. При нажатии этой кнопки от генератора ГИ на распределительную схему Р поступает импульс и на следующем её выходе появляется напряжение. На схеме приставки подсвечивается лампочкой номер выхода распределителя, на котором появляется напряжение.

В приборе не все положения являются рабочими. Имеются свободные положения. При переходе прибора в такие положения на панели загорается лампочка СВОБОДНЫЙ ШАГ.

4. Кнопка СУ. При нажатии этой кнопки сигнал с выхода СУ подается на схемы I_1 , I_2 , и I_{44} – I_{11} для управления состоянием триггеров регистра RG. Если на выходе СУ будет уровень 1 (в схеме моста перекомпенсация), то загорается лампочка у кнопки СУ.

Опыт 1. Исследование схемы автоматического выбора пределов измерения килоомметра Е6–5

В данном опыте производят наблюдение процесса выбора пределов измерения с помощью приставки. Опыт проводят в такой последовательности. К килоомметру подключают приставку с помощью кабеля через разъёмы. Включают прибор и дают ему прогреться в течение 15 минут. Включают приставку тумблером ПРИСТАВКА. Синхронизируют приставку с прибором нажатием кнопки СИНХРОНИЗАЦИЯ. После загорания лампочки СИНХРОНИЗАЦИЯ можно проводить измерение. Ко входу прибора Е6–5 подключают магазин сопротивлений и устанавливают на нем сопротивление, соответствующее исследуемому пределу измерения.

Управляют процессом измерения путем поочередного нажатия кнопки ШАГ и СУ. Поочередно нажимая кнопки ШАГ и СУ, следует сделать три шага и результаты наблюдений внести в таблицу 1.

При нажатии кнопки СУ загорается сигнальная лампочка, если СУ находится в состоянии 1; отсутствие свечения лампочки означает, что

состояние СУ нулевое. При некоторых шагах после нажатия кнопок переключаются пределы измерения, что можно обнаружить по состоянию СУ и положению запятой на ЦОУ прибора. В таблицу 1 вносят результаты наблюдений положения запятой на ЦОУ прибора до и после нажатия кнопки СУ. Состояние триггеров T_1 и T_2 и значения сопротивлений плеча R_0 вносят в таблицу 1 на основании логических выводов, вытекающих из алгоритма работы схемы выбора пределов измерения, и анализа процессов в схеме.

Опыт выполняется для значений сопротивлений R_x , соответствующих каждому из трех пределов измерения. В данном опыте необходимо выполнить расчеты элементов схемы моста.

Таблица 1

Предел измерения	Измеренное сопротивление R_x	Номер шага	До нажатия кнопки «СУ»				После нажатия кнопки «СУ»			
			Положение запятой	Состояние T_1	Состояние T_2	Величина R_0	Положение запятой	Состояние T_1	Состояние T_2	Величина R_0
3		1								
		2								
		3								
2		1								
		2								
		3								
1		1								
		2								
		3								

Исходя из того, что уравнивающее (компенсирующее) плечо моста R_2 имеет 4 декады, а единичная проводимость $G_0 = 0,25 \cdot 10^{-6}$ сим, нужно сделать следующее:

- определить максимальное число ступеней квантования N_{\max} ;
- вычислить значение максимальной компенсирующей проводимости $G_{k\max}$ уравнивающего плеча и соответствующее ему значение сопротивления R_x ;

в) вычислить сопротивление плеча R_x включаемого на время выбора предела измерения;

г) вычислить сопротивление плеча R_1 .

По состояниям триггеров T_1 и T_2 для трёх пределов измерения, полученным в таблице 1, синтезировать дешифратор схемы индикации положения запятой на ЦОУ для всех пределов измерения.

Результаты расчета и синтеза показать преподавателю, прежде чем приступить к следующему опыту.

Опыт 2. Исследование схемы уравнивания моста

Четвертый шаг, как было указано, предназначен для переключения схемы из режима выбора пределов измерения в режим уравнивания моста. Все последующие шаги предназначены для уравнивания моста. Эти шаги выполняют путем нажатия кнопок так же, как и при выполнении первых четырех шагов.

Следует иметь в виду, что зажигание сигнальной лампочки после нажатия кнопки «СУ» означает, что СУ перешло в состояние I, при этом один из триггеров $Q_{44} - Q_{11}$ (в зависимости от номера шага) возвращается в исходное (нулевое) состояние, и проводимость G_{ij} , вызвавшая перекомпенсацию, отключается. Если сигнальная лампочка не зажглась – СУ будет в состоянии 0, триггер, соответствующий данному шагу, останется в состоянии 1, а включенная при данном шаге проводимость останется включенной.

В данном опыте устанавливают на магазине заданное преподавателем сопротивление. Затем шаг за шагом выполняют уравнивание моста. Результаты наблюдений вносят в таблицу 2. Номер шага определяют по подсвеченному номеру входа распределительной схемы на панели приставки, веса проводимостей по показаниям ЦОУ, включаемый вес – по указанному на приставке весу включаемой проводимости, состояния триггеров после сравнения – по состоянию СУ.

Таблица 2

$R_x =$

Номер декады	Номер рабочего шага	Триггер, опрокидывающийся при шаге	Вес включаемой проводимости по показанию ЦОУ				Состояние триггера после сравнения (код)
			Исходный	Включаемый	Суммарный	Суммарный после сравнения	
4	5						
	6						
	7						
	8						
	.						
	.						
	.						
1	17						
	18						
	19						
	20						

По полученному результату измерения R'_x и установленному на магазине сопротивлению R_x определить относительную погрешность омметра:

$$\delta = \frac{R'_x - R_x}{R_x} \cdot 100\%.$$

Сравнить погрешность с допустимой, указанной на лицевой панели омметра.

Опыт 3. Исследование схемы исключения двойственности кодов

Процесс уравнивания моста выполняется по способу отработки снизу. В этом случае, как известно, для используемого в приборе кода 2–4–2–1 возможна двойственность кодов для числа 2. В схема приняты меры для исключения двойственности кодов. Логика работы уравнивающей схемы выполнена таким образом, что триггеры Q_{34} и Q_{24} , включающие проводимости с весам соответственно 4 и 2, могут установиться в состояние 1 только в том случае, если триггер Q_{44} , включающий разряд весом 2, находится в состоянии 1. Благодаря этому при отработке числа 2,

если не включилась проводимость G_{44} , не смогут включиться также проводимости G_{34} и G_{24} .

Таким образом, для числа 2 возможна лишь одна кодовая комбинация 1000, т.е. двойственности кодов не будет. В данном опыте, используя только старшую декаду (шаги 5–8), нужно исследовать процесс уравнивания моста при двух значениях измеряемых сопротивлений: $R_x < 2,000 \text{ кОм}$ и $R_x > 2,000 \text{ кОм}$. Значения сопротивлений R_x выбирают из указанных неравенств. Процесс уравнивания проводят так же, как и в предыдущем опыте.

Значения проводимостей определяют по показаниям ЦОУ. Результаты исследований вносят в таблицу 3.

Таблица 3

Номер шага	2,000 кОм > R_x =				2,000 кОм < R_x =			
	Исходный вес G_K	Вес включаемой проводимости	Вес G_K после сравнения	Код	Исходный вес G_K	Вес включаемой проводимости	Вес G_K после сравнения	Код
5								
6								
7								
8								

На основании данного выше описания алгоритма работы схемы исключения двойственности кодов дополнить схему рисунка элементами так, чтобы был реализован указанный алгоритм. Предложенную схему показать преподавателю.

3 Изучение принципа действия АЦП

Аналого–цифровой преобразователь (АЦП) типа Ф 733/1 выполнен по схеме поразрядного уравнивания. В преобразователе используется двоичный одиннадцатиразрядный код. АЦП имеет два предела измерения. На пределе измерения – 10 В преобразуются отрицательные

напряжения, ступень квантования $\Delta U = 5$ мВ. Предел измерения ± 5 В со ступенью квантования и $\Delta U = 2,5$ мВ предназначен для преобразования напряжений обеих полярностей.

В процессе преобразования отрицательное напряжение сравнивается по ступенчато изменяющимся во времени компенсирующим напряжением той же полярности. Ступени компенсирующего напряжения выбраны по двоичному коду.

Сравнение измеряемого напряжения – U_x и компенсирующего напряжения U_k производят с помощью сравнивающего устройства (СУ). По окончании процесса компенсации справедливо уравнение:

$$-U_x = -U_k = -\Delta U \cdot N_x, \quad (1)$$

где N_x – число ступеней квантования компенсирующего напряжения.

Кодовая комбинация включенных ступеней компенсирующего напряжения определяет величину U_x .

Для преобразования положительного напряжения используют те же ступени отрицательного компенсирующего напряжения. Для того чтобы это стало возможным, схему измерения несколько изменяют. Рассмотрим принцип построения схемы измерения положительного напряжения. Сравнивающее устройство АЦП сравнивает напряжения U_x и U_k одинаковой полярности. Поэтому при преобразовании положительных напряжений последовательно с компенсирующим напряжением отрицательной полярности включается источник напряжения смещения $U_{см}$ положительной полярности. Этим смещается начальный уровень результирующего компенсирующего напряжения $U'_k = U_{см} - U_k$ в область положительных значений. Величину напряжения смещения выбирают равной максимальному значению компенсирующего напряжения:

$$U_{см} = U_{k \max} = \Delta U \cdot N_{\max},$$

где N_{\max} – максимальное число ступеней квантования.

В процессе уравнивания изменяется отрицательное U_k до получения равенства:

$$U_x = U_{см} - U_k = U_{k \max} - U_k = \Delta U \cdot (N_{\max} - N_x). \quad (2)$$

Для взвешенных кодов существует правило: сумма прямого и обратного кода какого-то числа равна максимальному числу, которое можно представить этим кодом:

$$N_x + \bar{N}_x = N_{\max},$$

где N_x и \bar{N}_x – прямой и обратный код числа. С учетом этого соотношение (2) примет вид:

$$U_x = \Delta U \cdot (N_{\max} - N_x) = \Delta U \cdot \bar{N}_x.$$

Отсюда видно, что при преобразовании положительных напряжений значение U_x определяется обратным кодом АЦП.

Исходя из изложенного алгоритм преобразования напряжения обеих полярностей можно представить в следующем виде.

При первом шаге к измеряемому напряжению U_x подключается СУ и по его состоянию определяется полярность измеряемого напряжения. Если полярность отрицательна – в последующих шагах производится компенсация U_x напряжением \bar{U}_k . Код U_k определяет величину U_x .

При положительной полярности U_x в следующем шаге последовательно с напряжением U_k автоматически включается положительное напряжение U_{cm} . В последующих шагах достигается компенсация включением ступеней компенсирующего напряжения U_k согласно уравнению (2). Обратный код АЦП будет кодом напряжения U_x .

АЦП имеет знаковый разряд. Включение U_{cm} означает, что измеряемое напряжение U_x положительно, тогда в знаковом разряде высвечивается единица. При отрицательном напряжении U_x в знаковом разряде индицируется нуль.

Опыт 4. Преобразование отрицательного напряжения с помощью АЦП

Перед началом выполнения опыта на основании изложенного выше описания по аналогии с вышеприведенным рисунком составить схему уравнивания АЦП. Схему показать преподавателю. Затем приступить к эксперименту.

Установить АЦП на предел измерения ± 5 В. К АЦП подключить заданное преподавателем отрицательное напряжение $-U_x$. Напряжение $-U_x$ установить с помощью вольтметра.

Перед началом измерения тумблер установить в положение ВНУТРЕННЕЕ СЧИТЫВАНИЕ.

Для запуска АЦП нажать кнопку. Если в процессе преобразования произошел сбой, загорается лампочка НЕИСПРАВНОСТЬ. В этом случае преобразование нужно повторить.

После окончания преобразования отрицательного напряжения на табло появляется одиннадцатиразрядный двоичный код. Полученный код внести в таблицу 4.

В строку «вес разряда» внести вес двоичных разрядов, начиная с младшего разряда, вес которого равен единице. Следует иметь в виду, что на отсчётном устройстве АЦП старшие разряды располагаются слева, младшие справа. Просуммировав вес значащих разрядов, определить U_x , выраженное числом N_x ступеней квантования ΔU .

Таблица 4

Номер разряда	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Вес разряда											
Код АЦП											
Суммарное число веса значащих разрядов кода $N_x =$											
Ступень квантования $\Delta U = 2,5$ мВ											
Результат преобразования $U_x = \Delta U \cdot N_x =$											
Показания вольтметра U'_x											

Определить в процентах отклонение напряжения U_x , полученного с помощью АЦП, от показаний U'_x вольтметра:

$$\delta = \frac{U_x - U'_x}{U_x} \cdot 100\%.$$

Опыт 5. Преобразование положительного напряжения с помощью АЦП

В данном опыте следует изменить полярность измеряемого напряжения U_x без изменения величины. Опыт выполняют аналогично предыдущему. Отличие состоит лишь в том, что для определения U_x код, полученный с помощью АЦП, следует инвертировать.

Результаты измерений вносят в таблицу 5.

Таблица 5

Номер разряда	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Вес разряда											
Прямой код АЦП											
Обратный код АЦП											
Суммарное число веса значащих разрядов кода $\bar{N}_x =$											
Степень квантования $\Delta U = 2,5 \text{ мВ}$											
Результат преобразования $U_x = \Delta U \cdot \bar{N}_x =$											
Показания вольтметра U'_x											

$$\delta = \frac{U_x - U'_x}{U_x} \cdot 100\% =$$

Содержание отчета

Схема цифрового омметра (см. рисунок); схемы, которые необходимо составить по указаниям в опытах; таблицы с результатами измерений и вычислений.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия цифрового омметра.
2. Напишите условие равновесия одинарного моста.
3. Назначение операции выбора пределов измерения цифрового моста и алгоритм процесса выбора предела измерения.
4. Процесс уравнивания моста.
5. Схема исключения двойственности кодов.
6. Причины возникновения погрешности цифрового моста и пути их уменьшения.
7. Принцип действия двоичного АЦП. •
8. Преобразование положительных и отрицательных напряжений.
9. Погрешности АЦП и пути их уменьшения.

Литература

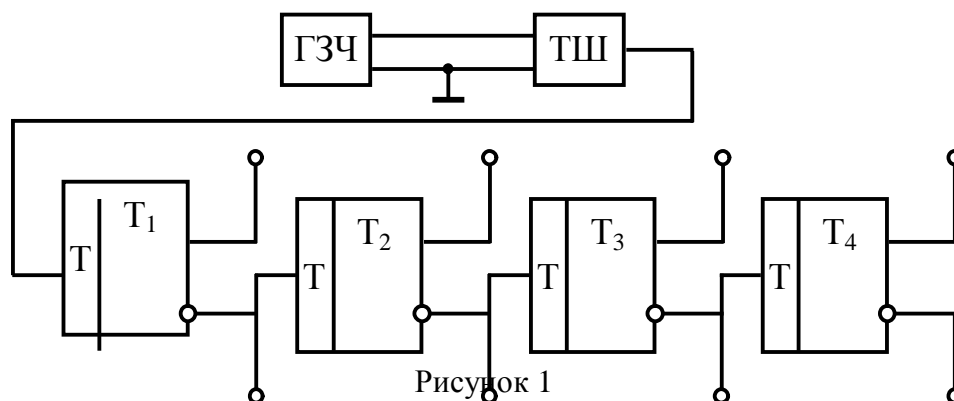
1. Шляндин В.М. Цифровые измерительные устройства. – М.: Высш. шк., 1981.
2. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы. – Киев: Вища шк., 1980.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ, ПЕРИОДА И ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ

Цель работы: знакомство с устройством, принципом действия и эксплуатационными характеристиками цифрового частотомера.

Описание макета

В работе используется макет четырехразрядного счетчика импульсов, который является источником сигналов, поступающих на цифровой частотомер. Макет счетчика подключен к выходу генератора звуковой частоты. Схема источника сигналов изображена на рисунке 1.



Между генератором звуковой частоты ГЗЧ и двоичным счетчиком, выполненным на триггерах $T_1 - T_4$, стоит формирователь прямоугольных импульсов, выполненный на основе триггера Шмитта ТШ. Оба выхода всех триггеров и триггера Шмитта выведены на гнезда. Эта схема обеспечивает получение на выходе а) напряжений синусоидальной формы, снимаемых с выхода ГЗЧ требуемой частоты f_x , которая устанавливается по шкале ГЗЧ; б) напряжения прямоугольной формы той же частоты f_x , снимаемом с выхода ТШ; в) напряжения прямоугольной формы с частотой $f_x/2^q$, где q – номер триггера, с которого снимается напряжение; г) импульсов напряжения различной длительности в зависимости от частоты

f_x , и от номера триггера, с которого снимается импульс.

В частотомере предусмотрен автоматический режим, ручное (кнопки СТАРТ, СТОП, СБРОС) и дистанционное управление (коаксиальные входы СТАРТ, СТОП, СБРОС).

Переключение этих режимов осуществляется переключателем АВТОМАТ – РУЧНОЕ.

Для измерения частоты, периода и длительности импульсов достаточно сбросить показания предыдущего измерения (автоматически, вручную или внешним сигналом). При автоматической работе прибора показания сбрасываются автоматически по истечении времени индикации, которое регулируется ручкой «время индикации» в пределах от 0,5 до 10 с.

Входы СТАРТ и СБРОС используются при измерении промежутков времени t_x (СТАРТ и СТОП) и при дистанционном управлении. Управление по этим входам осуществляется положительными импульсами. Уровень входных сигналов может быть ослаблен входным аттенюатором.

Опыт 1. Измерение частоты синусоидальных и импульсных напряжений

Краткое описание к выполнению опыта. В опыте производится измерение частоты напряжения, снимаемого с выхода ГЗЧ или с выходов делителя частоты двоичного счетчика импульсов по указанию преподавателя.

Измерение частоты с помощью цифрового частотомера состоит в подсчете с помощью счетчика импульсов числа колебаний входного сигнала в течение строго фиксированного промежутка времени $T_{и}$. Упрощенная схема частотомера для этого режима изображена на рисунке 2. Сигналы измеряемой частоты f_x поступают на формирователь Φ , преобразующий различные по форме и амплитуде сигналы в импульсы прямоугольной формы с определенной длительностью, амплитудой и частотой следования, равной f_x . Эти импульсы через ключ K (временной селектор) поступают на счетчик СЧ, который подсчитывает их. Ключ K открывается формирователем строб-импульса ФСИ на строго определенное время $T_{и}$, которое задается датчиком временных интервалов,

состоящим из кварцевого генератора стабильной частоты ГСЧ и делителя частоты ДЧ. Длительность $T_{и}$ может изменять оператор путем изменения коэффициента деления ДЧ. Число импульсов, поступивших в счетчик, будет равно: $N = f_x T_{и}$. Подсчитанное число импульсов индицируется на цифровом индикаторе. Относительная δ_0 и приведенная γ погрешности квантования вычисляются по формулам:

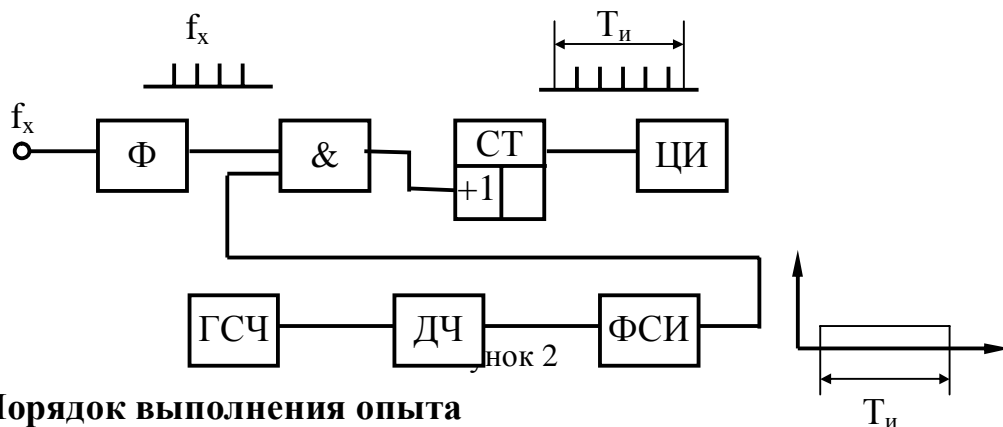
$$\delta_0 = \frac{1}{N} = \frac{1}{f_x T_{и}}; \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{1}{N_{\max}}, \quad (2)$$

где N – число импульсов, пришедших на счетчик при измерении данной частоты;

N_{\max} – объем счетчика импульсов частотомера.

Величина N и N_{\max} определяется по показаниям цифрового отсчетного устройства счетчика.



Порядок выполнения опыта

Включить частотомер и дать ему прогреться в течение 5 – 10 мин. Вход частотомера подключить или к выходу ГЗЧ, или к выходам делителя частоты в зависимости от заданной преподавателем величины измеряемой частоты.

Переключатель РОД РАБОТЫ частотомера установить в положение Ф. Произвести измерение заданной частоты. Для этого при ручном управлении для измерения необходимо нажать кнопку СБРОС. При автоматическом режиме работы измерение осуществляется без вмешательства оператора. Необходимо подобрать лишь удобное для отсчета время индикации ручкой с соответствующей надписью.

Измерение заданной частоты произвести при различных длительностях цикла измерения $T_{и}$. Длительность $T_{и}$ установить переключателем ВРЕМЯ ИЗМЕРЕНИЯ. Данные измерения занести в таблицу по форме.

Таблица 1

Время измерения, с	10^{-2}	10^{-1}	1	10	100
Показания частотомера, Гц					
Число импульсов счётчика N					
Относительная погрешность δ_0					

По цифровому отсчетному устройству определить объем счетчика N_{\max} и вычислить приведенную погрешность $\gamma = 1/N_{\max}$. По данным измерений вычислить величину относительной погрешности измерения частоты δ_0 . Построить график зависимости $\delta_0=f(T_{и})$, для $T_{и}$ использовать логарифмический масштаб. Определить приведенную погрешность γ и нанести на график в виде горизонтальной прямой.

Эскиз графика начертить в лаборатории и показать преподавателю.

Опыт 2. Исследование зависимости относительной погрешности квантования от частот при постоянном времени измерения частоты

Порядок выполнения эксперимента такой же, как в предыдущем опыте. Установив время измерения, производят измерения частот в некотором диапазоне. Время измерения и диапазон задает преподаватель. Результаты измерения вносят в табл. 2. По данным таблицы вычисляют относительную погрешность измерения $\delta_0=1/N$. Рассчитанные величины δ_0 используют для построения графика $\delta_0=f(f_x)$, где f_x – измеряемая частота.

Таблица 2

Время измерения $T_{изм} =$ с						
Измеряемая частота f_x , Гц						
Результат измерения, Гц						
Число импульсов N						
Относительная погрешность $\delta_0=1/N$						

Опыт 3. Исследование относительной погрешности при измерении периода

Краткое пояснение к выполнению опыта.

Измерение периода электрических колебаний T_x осуществляется путем квантования этого отрезка времени точно известными временными интервалами $T_0=1/f_0$ путем подсчёта количества импульсов с периодом следования T_0 , которые уложатся в один измеряемый период T_x или в n измеряемых периодов. Упрощенная блок-схема частотомера для этого режима изображена на рисунке 3. В этом режиме функционируют те же узлы, что и в предыдущем. Поменялись местами лишь цепи формирования временного интервала и счета импульсов.

Заполнение счетчика производится импульсами стабильной частоты f_0 , а не измеряемой частоты f_x .

Время измерения, т.е. длительность строб-импульса, в течение которого открыт ключ K и происходит подсчет импульсов счетчиком СЧ, задается одним или n измеряемыми периодами T_x .

Количество измеряемых периодов n задаётся оператором путем изменения коэффициента деления делителя частоты ДЧ.

Число импульсов, поступивших в счетчик, определяются как:

$$N=f_0nT_x.$$

Относительная погрешность квантования δ_0 определяется уравнением:

$$\delta_0=1/N=1/f_0nT_x.$$

Так как частота заполнения f_0 может оставаться постоянной, время измерения $T_{и}= nT_x$ при измерении T_x можно поддерживать постоянным, изменяя коэффициент деления n . Относительная погрешность квантования также будет оставаться постоянной.

Изложенное было бы справедливо при условии плавного изменения коэффициента деления n . В действительности коэффициент деления n изменяется ступенями в десятикратном соотношении. Поэтому зависимость погрешности квантования δ_0 от измеряемого периода имеет пилообразный вид. При изменении n изменяется также и время $T_{и}$.

В данном опыте исследуется зависимость относительной погрешности $\delta_0 = f(f_x)$ и времени измерения $T_{и} = f(f_x)$.

Порядок выполнения опыта Выполнить измерение длительности периодов напряжений при значениях n и k , указанных в таблице 3, частоту f_0 задает преподаватель.

Таблица 3

$f_{x0} = \text{Гц}$							
k	$f_x = k f_{x0}$	$T_x = \frac{1}{kf_{x0}}$	Число периодов, n	Время измерения, $T_{и} = nT_x$	Результат измерения, T_x	Число импульсов, N	Относительная погрешность, $\delta_0 = 1/N$
10			10				
5			10				
2			10				—
1			10				
1			1				
0,5			1				
0,2			1				
0,1			1				

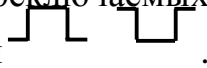
Для измерения T_x переключатель РОД РАБОТЫ частотомера поставить в положение Т. Вычислить время измерения $T_{и} = nT_x$. Результаты расчетов $T_{и}$, данные измерений T_x , число импульсов N занести в таблицу 3. Вычислить погрешность $\delta_0 = 1/N$. Начертить эскиз графиков $T_{и} = f(f_x/f_{x0})$ и $\delta_0 = f(f_x/f_0)$ в одной координатной системе. Относительная частота $f(f_x/f_{x0}) = K$ откладывается по горизонтальной оси в логарифмическом масштабе. Эскиз графика показать преподавателя. Полученный график сравнить с графиком, полученным в опыте 1.

Опыт 4. Измерение длительности импульса

Данное измерение выполняется по схеме рисунка 3. Отличие от метода измерения T_x состоит в том, что вместо формирователя частоты включается формирователь, вырабатывающий импульсы, соответствующие переднему и заднему фронтам измеряемого импульса. Этими импуль-

сами управляется формирователь строб-импульса ФСИ. Таким образом, в течение $\tau_{\text{и}}$ происходит заполнение счетчика импульсами стабильной частоты f_0 , а поэтому

$$N = T_{\text{и}} = f_0 \tau_{\text{и}}.$$

В опыте производится измерение длительности импульсов, получаемых на выходе триггера Шмитта и на выходах делителя частоты (см. рисунок 1). Для перевода прибора в режим измерения длительности импульсов переключатель РОД РАБОТЫ поставить в положение $\tau_{\text{и}}$. В приборе предусмотрена возможность измерения положительных и отрицательных импульсов. Переключение полярности переключаемых импульсов осуществляется переключателем с обозначениями . Измерение $\tau_{\text{и}}$ осуществляется также, как измерение периода T_x .

Выполнить измерение положительных и отрицательных импульсов, поочерёдно снимаемых с выходов ТШ и T_1 – T_4 , при одной частоте ГЗЧ, заданной преподавателем. Данные измерений занести в таблицу по приведенной ниже форме.

Таблица 4

Выход	ТШ	T_1	T_2	T_3	T_4
$\tau_{\text{и}}$	Отрицательный импульс				
	Положительный импульс				

Опыт 5. Измерение временных интервалов

Измерение временных интервалов также выполняется по схеме рисунка 3.

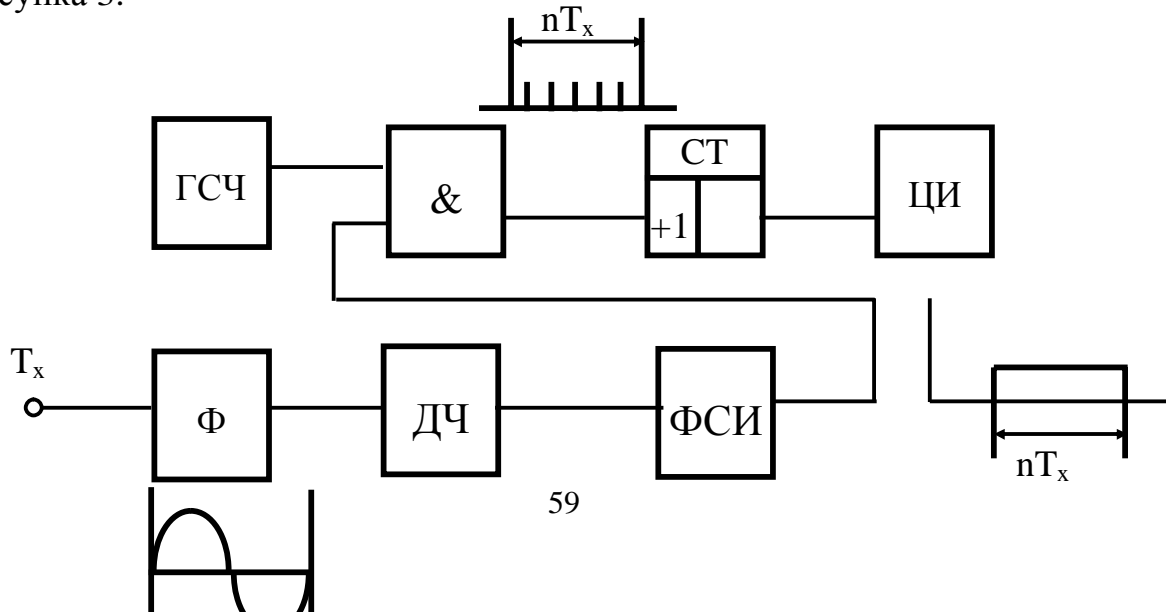


Рисунок 3

Начало и конец измеряемого интервала t_x должны быть представлены короткими импульсами, которые подаются по двум различным каналам на входы СТАРТ и СТОП частотомера.

Эти входы соединены с формирователем строб-импульса ФСИ.

Сигналы начала и конца измеряемого интервала t_x определяют начало и конец строб-импульса, в течение которого происходит заполнение счетчика импульсами стабильной частоты f_0 , а поэтому

$$N = f_0 t_x$$

В опыте производится измерение временных интервалов t_x , между моментами формирования положительных перепадов напряжения на левых и правых выходах триггера делителя частоты (рисунок 1). Для измерения используются входы частотомера СТАРТ и СТОП, которые подключают соответственно к левому и правому выходу триггера. Для перевода частотомера в режим измерения t_x необходимо переключатель РОД РАБОТЫ поставить в положение t . В приборе имеется возможность изменять предел измерения интервала времени изменением частоты f_0 импульсов, заполняющих интервал.

Выполнить измерение временных интервалов при заданной преподавателем частоте ГЗЧ. Данные внести в таблицу по приведенной ниже форме.

Таблица 5

$f = \Gamma\text{ц}$				
Выходы	T_1	T_2	T_3	T_4

Содержание отчёта

В отчёте привести схемы рисунков 1, 2, 3, таблицы с результатами измерений и вычислений. По данным таблиц 1, 2, 3 построить графики, как указано в описании соответствующих опытов.

Литература

1. Швецкий Б.И. Электронные цифровые приборы. – Киев: Техніка, 1981, - 137 с.
2. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы. -Киев.: Вища школа, 1960. - 183с.
3. Шляндин В.М. Цифровые измерительные устройства. - М.: Высшая школа, 1960. - 94 с.
4. Ермолов Р.С. Цифровые частотомеры. - М.: Энергия, 1973. - 100 с.,
3. Гитис Э.И. Цифровые преобразователи информации. - М.: Энергия, 1980. - 112 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТМЕТРА ВРЕМЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Цель работы:

1. Изучение принципа действия, устройства и работы цифрового вольтметра (ЦВ) с развертывающим временным преобразованием.
2. Экспериментальное определение эксплуатационных характеристик макета ЦВ.
3. Экспериментальное определение составляющих погрешности макета ЦВ и установление по ним класса точности.

1 Описание макета цифрового вольтметра

В работе исследуется макет ЦВ с развертывающим временным преобразованием. Его принцип действия основан на преобразовании измеряемого напряжения U_x в пропорциональный ему интервал времени t_x с помощью аналогового преобразователя (АП), последующем квантовании и кодировании полученного интервала t_x с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) временного интервала t_x/N_x . Преобразование U_x/t_x производится путем сравнения измеряемого напряжения U_x с образцовым напряжением развертки, изменяющимся по линейному закону. При этом выделяется временной интервал от начала развертки до момента равенства сравниваемых напряжений и представляется в виде импульса

прямоугольной формы. Квантование полученного интервала t_x производится путем подсчета с помощью счетчика импульсов числа образцовых интервалов времени, уложившихся в интервал времени t_x .

Структурная схема макета ЦВ представлена на рисунке 1. Согласно принципу действия схема содержит два основных узла: АП U_x/t_x и АЦП t_x/N_x , а также устройство управления. В состав АП входит генератор линейно-изменяющегося (пилообразного) напряжения ГЛИН, сравнивающее устройство СУ и RS-триггер Т. В состав АЦП t_x/N_x входит генератор квантующих импульсов ГКИ, схема совпадения СС (или ключ), счетчик импульсов СТ, дешифратор ДС и цифровой индикатор ЦИ.

Устройство управления обеспечивает работу ЦВ в ручном или автоматическом режиме, задает длительность времени измерения и индикации, а также осуществляет сброс результатов предыдущего измерения перед последующим. Оно содержит ждущий мультивибратор М, задающий длительность времени измерения, генератор синхронизации ГС, задающий период повторения циклов измерения в автоматическом режиме, кнопки ПУСК и СБРОС (последняя на схеме не показана).

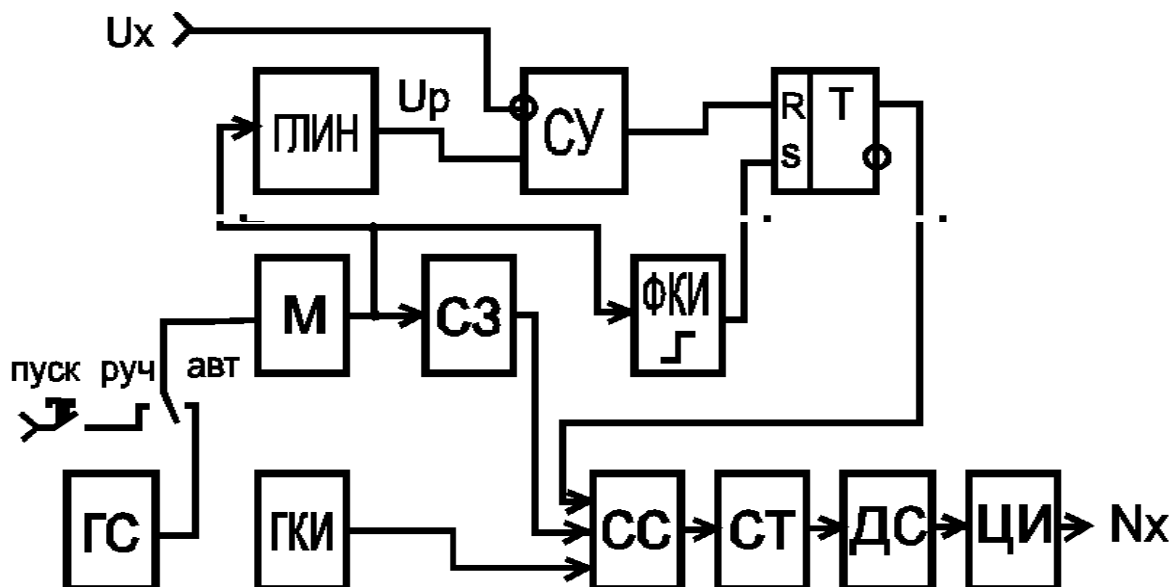


Рисунок 1 – Структурная схема макета ЦВ

Работа ЦВ начинается с запуска М от ГС в автоматическом режиме или кнопкой ПУСК в ручном режиме. Выходной импульс М запускает генератор развертки, т.е. ГЛИН, одновременно по его фронту через формирователь короткого импульса ФКИ триггер Т по S-входу устанавливает

ливается в единичное состояние. Линейно–изменяющееся выходное напряжение ГЛИНа U_p поступает на неинвертирующий вход СУ и сравнивается с измеряемым напряжением U_x , подаваемым на инвертирующий вход СУ. В момент равенства сравниваемых напряжений, т.е. при $U_p=U_x$, СУ вырабатывает импульс с уровнем логической «1». Он поступает на R-вход триггера Т и устанавливает его в исходное (нулевое) состояние. Временной интервал t_x , представленный длительностью выходного импульса триггера, пропорционален измеряемому напряжению U_x :

$$t_x = U_x / V_p,$$

где V_p – крутизна или скорость изменения пилообразного напряжения.

Выражение для t_x , т.е. уравнение преобразования АП U_x/t_x , можно представить как:

$$t_x = K_t U_x, \quad (1)$$

где $K_t = t_x / U_x = 1 / V_p$ [мкс/В] – коэффициент преобразования преобразователя U_x/t_x . (2)

Выходной импульс триггера Т поступает на один из входов трехвходовой СС, на второй вход которой непрерывно поступают квантующие импульсы от ГКИ с частотой f_0 . Третий вход СС подключен к выходу схемы задержки СЗ, назначение которой изложено ниже при рассмотрении погрешностей ЦВ. На выходе СС появится «пачка» импульсов состоящая из N_x импульсов, следующих с частотой f_0 и уложившихся в интервал t_x . Эти импульсы подсчитываются счетчиком СТ, их число преобразуется дешифратором ДС и индицируется ЦИ. Число импульсов N_x , поступивших в счетчик, пропорционально t_x , а следовательно, и U_x . Уравнение преобразования ЦВ:

$$N_x = f_0 t_x = f_0 K_t U_x = K_{\Pi} U_x, \quad (3)$$

где $K_{\Pi} = N_x / U_x = f_0 K_t$ [1/В] – коэффициент преобразования ЦВ, показывающий число импульсов или ступеней квантования, приходящихся на 1 вольт входного напряжения.

(4)

Из уравнения преобразования ЦВ измеряемое напряжение можно выразить:

$$U_x = N_x / (f_0 K_t) = (1 / K_{\Pi}) N_x = \Delta U_K N_x,$$

где $\Delta U_k = U_x / N_x = 1 / K_n = 1 / (f_0 K_t)$ [В] – размер ступени квантования ЦВ. (5)

Для того, чтобы число импульсов N_x , индицируемое на ЦИ, являющееся результатом измерения, представляло его в принятых единицах измерения (вольтах или милливольтмах) необходимо, чтобы коэффициент преобразования K_n был кратен 10, т.е.:

$$K_n = f_0 K_t = 10^i, \quad (6)$$

где $i=0,1,2,\dots$. Местоположение запятой на ЦИ и размерность результата при этом определяется значением i .

Изложенный принцип действия, устройство и работа ЦВ определяют основные свойства вольтметров этого типа. Они обладают достаточно высоким быстродействием и могут обеспечить до 10^4 изм/с. Измеряют эти ЦВ мгновенное значение напряжения, что делает их незащищенными от воздействия помех. По точности они относятся к приборам невысокого и среднего класса точности.

1.1 Генератор линейно-изменяющегося напряжения

Метрологические и технические характеристики ЦВ с временным преобразованием определяет, в основном, ГЛИН. Они строятся с использованием в качестве линейно-изменяющегося напряжения на емкости при ее заряде или разряде. Напряжение $U_c(t)$ и ток заряда емкости $i_c(t)$ при нулевых начальных условиях связаны соотношением:

$$U_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt$$

Для получения линейной зависимости напряжения $U_c = f(t)$ вида $U_c(t) = V_p t$ необходимо выполнить одно условие: обеспечить постоянство зарядного (или разрядного) тока, т.е. $i_c(t) = i_c = \text{const}$. При выполнении этого условия выражение для $U_c(t)$ примет вид:

$$U_c(t) = (i_c / C) t = V_p t \quad (7)$$

Разновидности схем ГЛИН отличаются способом стабилизации зарядного тока емкости. Идеально стабильного тока заряда емкости не обеспечивает ни один из способов. Поэтому и идеально линейного напряжения, описываемого соотношением (7), ГЛИН не генерирует. Он генерирует напряжение, изменяющееся по экспоненте. Причем постоянная

времени экспоненты зависит от стабильности зарядного тока. Нелинейность пилообразного напряжения за время цикла развертки принято оценивать коэффициентом нелинейности K_n , определяемым соотношением:

$$K_n = (V_{pн} - V_{pк}) / V_{pн},$$

где $V_{pн}$, $V_{pк}$ - скорость или крутизна напряжения ГЛИН в начале и в конце цикла развертки.

В настоящее время лучшим по линейности напряжения является ГЛИН на основе интегратора, схема которого изображена на рис.2. Управляет работой ГЛИНа электронный ключ ЭК, который в исходном состоянии замкнут, и выходное напряжение усилителя $U_p = 0$. При подаче управляющего импульса от мультивибратора М на ЭК он размыкается на время цикла развертки (измерения). При этом напряжение на выходе ГЛИНа нарастает за счет заряда емкости С стабильным током, который определяется соотношением: $i_c = U_0 / R$. После окончания цикла развертки ЭК замыкается, и емкость С разряжается по цепи замкнутого ЭК.

Напряжение на выходе этого ГЛИНа во время цикла развертки, основываясь на (7), можно выразить:

$$U_p = U_c(t) = (i_c / C)t = (U_0 / RC)t = V_p t,$$

где $V_p = U_0 / RC$.

Скорость или крутизну развертки ГЛИНа можно менять, изменяя U_0 или R . В макете предусмотрена регулировка крутизны изменением R . Ручка регулировки крутизны выведена на лицевую панель макета. На лицевой панели также имеются органы регулировки нелинейности напряжения ГЛИНа.

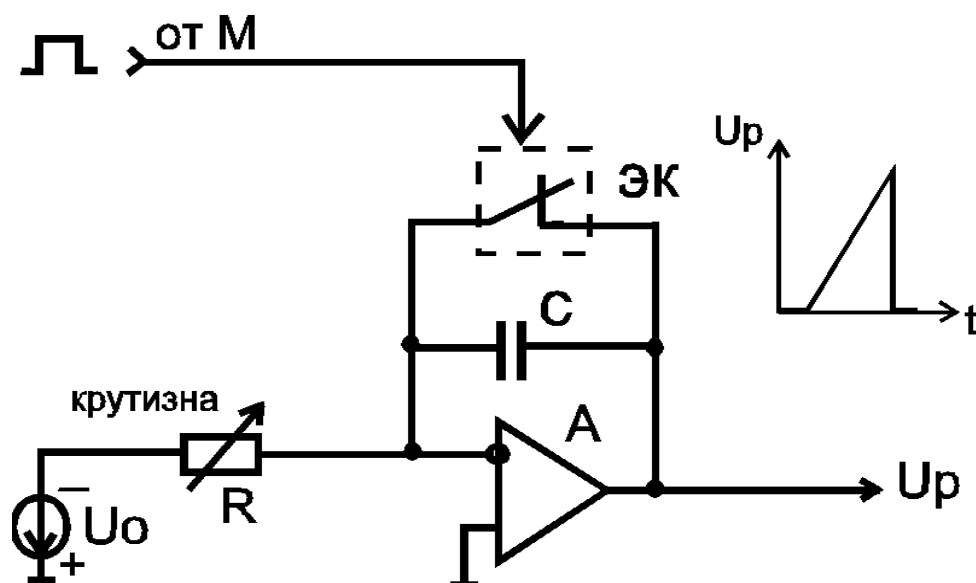


Рисунок 2 – Схема ГЛИНа

2 Погрешности ЦВ с временным преобразованием

В этом ЦВ погрешности возникают в АП U_x/t_x и в АЦП t_x/N_x . Основной вклад в суммарную погрешность ЦВ вносит АП U_x/t_x . При преобразовании U_x/t_x возникают составляющие, обусловленные, в основном, следующими факторами: нестабильностью крутизны или скорости нарастания пилообразного напряжения, наличием порога срабатывания СУ и его нестабильностью, смещением начального (нулевого) уровня напряжения развертки и его нестабильностью, нелинейностью пилообразного напряжения. Механизм возникновения этих составляющих показан на рисунках 3–5. На этих рисунках развертка U_p , выполненная сплошными линиями, представляет идеальный закон изменения U_p . Ему соответствует временной интервал t_x . Штриховыми линиями показан реальный закон (в утрированном виде).

Изменение крутизны развертки (прямая U'_p на рисунке 3) приводит к возникновению погрешности крутизны $-\Delta t_k$, уменьшающей t_x на величину Δt_k при возрастании V_p , (что видно из рисунка 3) или увеличивающей t_p при уменьшении V_p . Причиной нестабильности крутизны является нестабильность параметров, входящих в выражение (8) для V_p . Наличие порога срабатывания U_n в СУ (см. рисунок 4) приводит к возникновению погрешности Δt_n , обусловленной порогом срабатывания СУ и увеличивающей t_x на величину Δt_n .

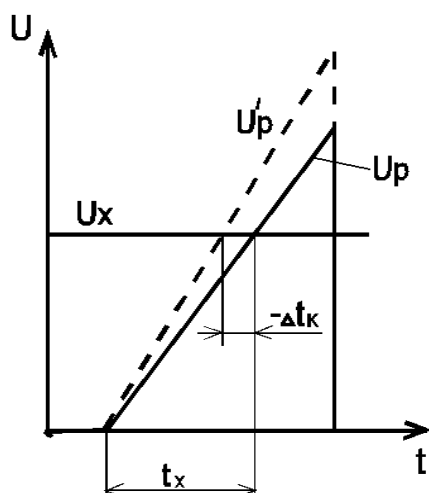


Рисунок 3

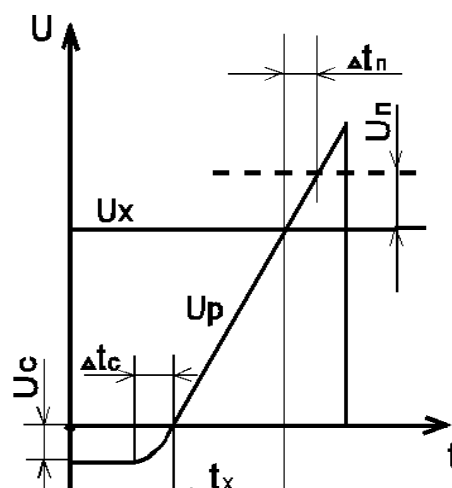


Рисунок 4

Начальный участок пилообразного напряжения ГЛИНа является нелинейным, а его уровень – нестабильным. Это приводит к возникновению погрешности. Для исключения этой составляющей погрешности нулевой уровень «пилы» смещают в область отрицательных значений на величину U_c (см. рисунок 4). Однако при этом возникает погрешность Δt_c , увеличивающая t_x . В некоторых ЦВ этого типа для исключения этой погрешности вводится второе СУ, на один вход которого подаётся U_p , а на второй – нулевой потенциал. При этом триггер Т по S-входу управляется не сигналом с выхода М, а сигналом с выхода второго СУ. В макете ЦВ для исключения погрешности Δt_c в схему АП введена схема задержки СЗ, которая запускается одновременно с ГЛИНом (см. рисунок 1) и генерирует импульс с уровнем логического «0» длительностью t_3 . Этот импульс, поступая на третий вход СС, запрещает поступление импульсов на СТ от ГКИ на время t_3 . Если выбрать время задержки $t_3 = \Delta t_c + \Delta t_n$, то кроме погрешности Δt_c , обусловленной смещением нуля «пилы», будет исключена и составляющая Δt_n , обусловленная порогом срабатывания СУ. При этом останутся неисключёнными лишь составляющие, обусловленные нестабильностью начального уровня развертки, порога срабатывания СУ и времени задержки СЗ.

Наиболее существенной в АП U_x/t_x является погрешность нелинейности пилообразного напряжения, возникновение которой поясняется рисунком 5. Величина и знак этой погрешности зависят не

только от коэффициента нелинейности K_n , но и от способа совмещения кривой развертки (U_p на рисунке 5а) с идеальной прямой (U_{p1} , U_{p2} или U_{p3}).

Возможны 3 варианта совмещения или калибровки. При первом варианте совмещаются начальная и конечная точки разверток - прямая U_{p1} . При этом возникает погрешность $-\Delta t_{n1}$. Она отрицательна во всем диапазоне значений U_x и максимальна при $U_x \cong U_{pm}/2$ (см. рисунок 5б). При втором варианте калибровки совмещаются начальные точки разверток, а крутизна идеальной прямой принимается равной крутизне реальной кривой в начале развертки, т.е. V_{pn} (прямая U_{p2}). При этом возникает погрешность Δt_{n2} (на рисунке 5а она не показана). Ее зависимость от U_x представлена на рисунке 5б, откуда видно, что она положительна во всем диапазоне U_x и максимальна при $U_x = U_{pm}$.

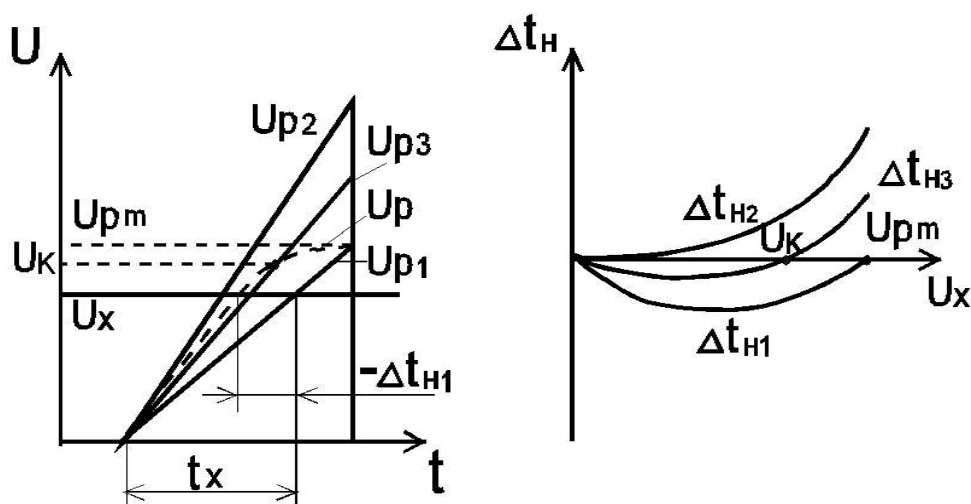


Рисунок 5

При третьем варианте калибровки совмещаются 2 точки разверток: начальная и промежуточная при некотором значении напряжения калибровки $U_x = U_k$, которое выбирается из диапазона $0 < U_k < U_{pm}$. Этому варианту соответствует прямая U_{p3} . При этом возникает погрешность Δt_{n3} , зависимость которой от U_x изображена на рисунке 5б. Она имеет различный знак в зависимости от U_x , а значение U_x , при котором она максимальна зависит от значения калибровочной точки U_k .

На рисунке 5б приближенно соблюдены количественные соотношения для погрешности Δt_n при различных способах калибровки. Поэтому сопоставление различных способов калибровки показывает, что наиболее

предпочтительным является третий способ калибровки. В АЦП t_x/N_x возникают две составляющие погрешности. Первая – это погрешность квантования, обусловленная тем, что в интервал t_x , в общем случае, укладывается не целое число периодов квантующих импульсов, вырабатываемых ГКИ. Вторая составляющая – это погрешность обусловленная нестабильностью периода квантующих импульсов, т.е. частоты ГКИ. При нормировании погрешности ЦВ, т.е. при установлении его класса точности, не существенно деление составляющих погрешности по источнику и причине их возникновения. Важным является их деление на две группы по зависимости значений погрешности от значений измеряемого напряжения: на аддитивную и мультипликативную погрешности. Аддитивная – это погрешность, абсолютное значение которой не зависит от измеряемого напряжения, т.е. постоянно при любом значении U_x . Мультипликативная – это погрешность, абсолютное значение которой пропорционально измеряемому напряжению, т.е. зависит от U_x . Из перечисленных ранее составляющих погрешности макета ЦВ к аддитивной относятся: погрешность, обусловленная смещением начального уровня «пилы» и его нестабильностью, наличием порога срабатывания СУ и его нестабильностью, а также нестабильностью времени задержки t_z , вносимой СЗ, и погрешность квантования. К мультипликативной относятся: погрешность, обусловленная нестабильностью крутизны пилообразного напряжения, нестабильностью частоты ГКИ и погрешность нелинейности пилообразного напряжения. Последняя составляющая имеет нелинейную зависимость от U_x (см. рисунок 5б), а не пропорциональную, как требуется для отнесения ее к мультипликативной. Для приведения ее к мультипликативной нелинейную зависимость $\Delta t_n = f(U_x)$ аппроксимируют двумя прямыми, выходящими из начала координат под одинаковыми углами. Угол наклона прямых выбирают таким, чтобы погрешность нелинейной зависимости не превышала погрешности, задаваемой аппроксимирующими прямыми, для положительной и отрицательной погрешности во всем диапазоне изменения U_x .

Опыт 1. Изучение работы макета ЦВ и определение его технических характеристик

1. Изучив принцип действия и устройство макета ЦВ, ознакомиться с органами управления, выведенными на лицевую панель макета, и их назначением.

2. Включить для прогрева образцовые приборы, с помощью которых будет исследоваться макет ЦВ: вольтметр, частотомер и осциллограф. Включить макет ЦВ.

3. Подготовить макет ЦВ и осциллограф для наблюдения осциллограмм в контрольных точках макета. Для этого перевести макет в режим автоматического запуска, установив переключатель макета в положение АВТ. Осциллограф перевести в режим внешней синхронизации. Начало цикла измерения в макете задает ГС. Поэтому сигнал с выхода ГС макета подать на вход внешней синхронизации осциллографа, чем будет обеспечена привязка всех осциллограмм к одной точке отсчета времени – началу цикла измерения.

4. Исследовать с помощью осциллографа зависимость временного интервала t_x , наблюдаемого на выходе триггера Т, и длительности пачки импульсов на выходе СС от величины измеряемого напряжения U_x и от крутизны пилообразного напряжения при постоянном U_x . Регулировку U_x и крутизны производить соответствующими ручками макета.

5. По ЦИ макета или по образцовому вольтметру, подключенному к гнездам « U_x » макета, установить $U_x=(5-8)$ В. Установить среднее значение крутизны пилообразного напряжения и минимальное значение нелинейности. Соблюдая одинаковые для всех осциллограмм временной и амплитудный масштабы, зарисовать с экрана осциллографа временные диаграммы на протяжении двух циклов развертки в контрольных точках макета, т.е. на выходах: ГС, М, ГЛИН (и в этих же координатах – U_x), СУ, Т, ГКИ, СЗ, СС.

6. По полученным осциллограммам определить: амплитуду напряжения развертки U_{pm} ; номинальное время измерения $t_{и}$, которое равно длительности импульса на выходе ГЛИН; время индикации $t_{ин}$, т.е. время между окончанием предыдущего цикла и началом следующего цикла развертки; длительность полного цикла измерения $t_{ц}=t_{и}+t_{ин}$. Найти быстродействие макета, выразив его через число измерений в единицу времени, т.е. $n=1/t_{ц}$.

По значению U_{pm} определить предел измерения U_n , который должен удовлетворять двум условиям: $U_n \leq U_{pm}$ и $U_n = 10^a$, где $a = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$.

По ЦИ макета найти объем счетчика импульсов или номинальное число ступеней квантования макета ЦВ – N_n , которое определяется соотношением $N_n = 10^m$, где m – число декад СТ.

По соотношению (2) определить коэффициент преобразования K_t АП U_x/t_x , приняв в качестве значений t_x и U_x их номинальные значения t_n и U_n , и округлить его до ближайшего значения, определяемого соотношением: $K_t = 10^a$ [мкс/В], где $a = 0, 1, 2, 3 \dots$.

Пользуясь соотношениями (4) и (5), определить коэффициент преобразования ЦВ K_n и размер ступени квантования ΔU_k , положив в (4) и (5) вместо текущих значений U_x и N_x их номинальные значения.

Все результаты определения и расчета параметров занести в таблицу 1.

Таблица 1

Параметр	U_{pm} , В	U_n , В	t_n , мс	$t_{ин}$, мс	$t_{ц}$, мс	n , изм/с	N_n	K_t , мкс/В	K_n , 1/В	ΔU_k , В
Знач. параметра										

Опыт 2. Калибровка макета ЦВ

Калибровка преследует две цели. Первая – установить значение K_n удовлетворяющее равенству (6) и равное значению, полученному в опыте 1. После выполнения этой операции число N_x на ЦИ макета будет выражать измеряемое напряжение U_x в принятых единицах, т.е. вольтах. Положение запятой в этом числе определяется размером ступени квантования ΔU_k . Вторая цель - исключить погрешность, обусловленную смещением начального уровня «пилы» и порогом срабатывания СУ.

Опыт выполняется в следующей последовательности:

1. К гнездам « U_x » макета подключить образцовый ЦВ, а частотомер, работающий в режиме измерения длительности импульса с разрешающей способностью 0,1 мкс – к выходу триггера Т макета. Макет ЦВ, образцовый ЦВ и частотомер перевести в режим автоматического запуска.

Установить заданные преподавателем нелинейность ГЛИНа, а по образцовому ЦВ вторую калибровочную точку, т.е. $U_x=U_k$.

2. Произвести установку коэффициента преобразования напряжения во временной интервал K_t , равным или близким к значению, представленному в таблице 1. Для этого подавать на вход макета поочередно во времени $U_x=0$ и $U_x=U_k$. Для упрощения процесса поочередной подачи этих напряжений устанавливается $U_x=U_k$ и не меняется, а $U_x=0$ подается нажатием кнопки на макете, подключающей вход СУ к общей шине.

При поочередной подаче калибровочных напряжений частотомером измеряется длительность импульса на выходе триггера Т. Из-за нестабильности порога срабатывания СУ и начального уровня «пилы» показания частотомера будут незначительно меняться при одном и том же значении U_x , так как частотомер работает в автоматическом режиме и производит многократные измерения одного и того же интервала. При регулировке и расчете брать среднее значение этого интервала.

Регулируя крутизну пилообразного напряжения при поочередной подаче калибровочных напряжений, добиться, чтобы приращение временного интервала Δt_k на выходе триггера при приращении калибровочного напряжения на величину U_k (от 0 до U_k) составляло величину (с отклонением $\pm 1\%$):

$$\Delta t_k = K_t U_k.$$

После выполнения этого условия измерить длительность интервала (импульса на выходе Т) t_0 и t_k при $U_x=0$ и $U_x=U_k$ и занести их в таблицу 2.

Таблица 2

Измеряемая величина		t_0 при $U_k=0$ В, мкс	t_k при $U_k=\dots$ В, мкс	K_{tk} , мкс/В	f_0 кГц	t_3 мкс
Значение	При калибровке					
	После выполнения п. 5 опыта 3					

По полученным значениям найти и занести в таблицу 2 экспериментально установленное значение при калибровке $K_{тк}=(t_k-t_0)/U_k$. Погрешность вычисления (округления при вычислении) $K_{тк}$ не должна превышать 0,01%.

3. Пользуясь выражением (6) и значениями K_n (таблица 1) и K_t (таблица 2), вычислить значение частоты f_0 ГКИ (с той же погрешностью, что и $K_{тк}$) и занести его в таблицу 2. Установить рассчитанное значение частоты f_0 на выходе ГКИ. Для этого частотомер перевести в режим измерения частоты, подключить вход измерения частоты к выходу ГКИ и ручкой регулировки частоты ГКИ установить значение частоты f_0 . При этом время измерения частотомера необходимо выбрать таким, чтобы погрешность квантования частотомера не превышала 0,01%.

4. Для исключения погрешности, обусловленной смещением начального уровня «пилы» и порога срабатывания СУ установить длительность импульса на выходе СЗ $t_3=t_0$. Для этого частотомер, работающий в режиме измерения длительности импульса, подключить к выходу СЗ и ручкой регулировки задержки установить $t_3=t_0$. Установленное значение занести в таблицу 2.

Калибровка закончена. В дальнейшем положение ручек регулировки параметров макета, которыми производили калибровку, не менять.

Опыт 3. Экспериментальное определение составляющих погрешности макета ЦВ

1. Составляющие погрешности ЦВ, причина и источники возникновения которых приведены в разделе 2, экспериментально определяются различными способами.

Ряд из них определяют по их нестабильности во времени. Для этого производят первое измерение (при калибровке) соответствующих параметров, а через время – другое и по разности определяют погрешность. Таким образом определяют погрешности, обусловленные нестабильностью: начального уровня пилообразного напряжения, времени задержки СЗ, крутизны пилообразного напряжения, частоты ГКИ.

Погрешность, обусловленную нестабильностью порога срабатывания СУ определяют путем многократного измерения временного интервала t_x на выходе триггера Т при неизменном значении U_x . Погрешность определяется по возникающему при этом разбросу значений t_x .

Погрешность нелинейности пилообразного напряжения определяется путем сравнения экспериментально полученной характеристики преобразования преобразователя U_x/t_x с идеальной.

2. Снять статическую характеристику преобразования АП U_x/t_x , что позволит определить две последние составляющие погрешности, указанные в п. 1 этого опыта. Для этого макет, образцовый вольтметр и частотомер подключить и перевести в режимы указанные в п. 1 опыта 2.

На вход макета ЦВ подавать заданные преподавателем значения U_x , устанавливая их по образцовому вольтметру. Наблюдая по частотомеру меняющиеся значения t_x при каждом значении U_x , выделить из них минимальное и максимальное значения и занести в таблицу 3.

3. По экспериментальным данным таблицы 3 вычислить для всех значений U_x абсолютную погрешность Δt_{Π} , обусловленную нестабильностью порога срабатывания СУ: $\Delta t_{\Pi} = t_{x \max} - t_{x \min}$.

4. Для определения погрешности нелинейности произвести вычисления:

1) значений экспериментальной характеристики преобразования $t_{x \text{ ср}} = f(U_x)$:

$$t_{x \text{ ср}} = \frac{t_{x \min} + t_{x \max}}{2}$$

Таблица 3

$U_x, \text{ В}$											
$t_{x \min}, \text{ мкс}$											
$t_{x \max}, \text{ мкс}$											
$\Delta t_{\Pi}, \text{ мкс}$											
$t_{x \text{ ср}}, \text{ мкс}$											
$t_{x \text{ р}}, \text{ мкс}$											
$\Delta t_{\Pi}, \text{ мкс}$											

$\delta_n, \%$											
----------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

2) значений идеальной или расчетной характеристики преобразования $t_{xp}=f(U_x)$, используя при этом установленное при калибровке значение K_{tk} :

$$t_{xp}=K_{tk}U_x+t_{xcp.o},$$

где $t_{xcp.o}$ - среднее значение интервала t_x при $U_x=0$. Введение в выражение для t_{xp} слагаемого $t_{xcp.o}$, которого нет в (1), необходимо для совмещения начальных точек (при $U_x=0$) экспериментальной и расчетной характеристик. Этим исключается погрешность, обусловленная смещением нуля «пилы», и различия между идеальной и реальной характеристиками будут определяться только нелинейностью реальной характеристики.

3) абсолютного и относительного значений погрешности нелинейности для всех значений U_x :

$$\Delta t_n = t_{xp} - t_{xp} \quad \text{и} \quad \delta_n = \frac{\Delta t_n}{t_{xp}} 100\%$$

5. Для определения составляющих погрешности, обусловленных нестабильностью параметров узлов макета во времени (см. п.1 опыта), произвести измерение t_o , t_k , f_o , t_3 , установленных при калибровке (см. таблицу 2). Методика измерения изложена в опыте 2. При этом никаких регулировок параметров узлов макета не производить. Выполнить лишь измерения, занести их в таблицу 2, вычислить новое значение K_{tk} .

6. По результатам вычисления погрешности нелинейности (таблицу 3) построить зависимость $\Delta t_n=f(U_x)$. Эту зависимость аппроксимировать двумя прямыми, как указано в разделе 2. Найти относительную погрешность, определяемую аппроксимирующими прямыми, и сопоставить ее с максимальным значением δ_n таблицы 3.

Опыт 4. Экспериментальное определение результирующей погрешности макета ЦВ

Результирующая погрешность определяется путем сопоставления значений входного напряжения макета, измеряемого образцовым вольтметром, и результата измерения, получаемого на ЦИ макета.

В опыте производится однократное и многократное измерения напряжения со статистическим усреднением результата измерения. Статистическое усреднение при многократных измерениях уменьшает влияние случайных составляющих погрешности и повышает помехозащищенность ЦВ. При автоматизации этого процесса это переводит ЦВ в разряд интегрирующих, т.к. результат оказывается усредненным по ансамблю мгновенных значений:

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{K} \sum_{i=0}^K U_{xi} ,$$

где K – число измерений.

Режим статистического усреднения в опыте реализуется без усложнения схемы (необходимого при автоматизации) и без проведения операции суммирования и деления оператором. Для этого необходимо перевести макет ЦВ в режим ручного запуска и кнопкой ПУСК макета произвести запуск (т.е. измерения) K раз, не производя сброса результата предыдущего измерения. Операция суммирования будет выполнена счетчиком импульсов СТ. Операция деления на K упростится, если число измерений K выбрать равным 10. Тогда она заменится переносом запятой на ЦИ макета на один десятичный разряд влево.

Следует, однако, учитывать следующее обстоятельство. Если СТ и ЦИ макета имеют ограниченный объем (при однократном измерении задействованы все декады), то при суммировании старший разряд усредненного результата окажется в несуществующем старшем разряде СТ и ЦИ и не будет индицироваться. Однако число в старшем разряде усредненного результата равно числу в старшем разряде при однократном измерении. Например: при однократном измерении получен результат $U_{x1}=2.3$ В. При десятикратном измерении на ЦИ макета получен результат 3.5 (или 2.7). Тогда результат измерения при усреднении будет $U_{\text{ср}}=2.35$ (или 2.27 В).

Для выполнения опыта макет перевести в режим ручного запуска. Для значений напряжения U_x , заданных преподавателем и устанавливаемых по

образцовому вольтметру, произвести однократное измерение U_x , а затем не меняя его – десятикратное. Для этого после установки U_x кнопкой СБРОС макета сбросить результат предыдущего измерения, а кнопкой ПУСК произвести однократное измерение и его результат U_{x1} отсчитать по ЦИ макета. Затем сбросить результат однократного измерения, а десятикратным нажатием кнопки ПУСК произвести многократное измерение. Усредненное значение $U_{\text{хср}}$ отсчитать по ЦИ макета, учитывая методику получения $U_{\text{хср}}$, изложенную раньше. Результаты измерения занести в таблицу 4.

Таблица 4

$U_x, \text{В}$											
$U_{x1}, \text{В}$											
$U_{\text{хср}}, \text{В}$											
$\delta_1, \%$											
$\delta_y, \%$											
$\delta_d, \%$											

По полученным данным найти относительные значения результирующей погрешности макета ЦВ при однократном измерении δ_1 и при усреднении результата измерения δ_y для всех значений U_x :

$$\delta_1 = \frac{U_{x1} - U_x}{U_x} 100\% \quad \text{и} \quad \delta_y = \frac{U_{\text{хср}} - U_x}{U_x} 100\%$$

3 Установление класса точности макета ЦВ по экспериментальным значениям составляющих погрешности

Класс точности определяет предельно допустимое значение погрешности прибора, т.е. границы, за пределы которых не должна выходить погрешность прибора. Для ЦВ класс точности задается двумя числами в виде отношения c/d . При этом подразумевают, что $d = \gamma_a$ – приведенное значение аддитивной погрешности, выраженной в процентах, $c = \gamma_a + \delta_m$ – сумма приведенного значения аддитивной и относительного значения мультипликативной погрешности, выраженная в процентах. Значения c и d выбирают согласно требованиям ГОСТа из ряда чисел: [1; 1.5; (1.6); 2; 2.5;

(3); 4; 5; 6; (7); (8)]10^a, где a=1;0;-1;-2;... Значения в круглых скобках не рекомендованы и допускаются лишь в отдельных случаях.

При таком задании класса точности относительное значение предельно допустимой погрешности для любого значения измеряемого напряжения U_x определяется выражением:

$$\delta_d = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{U_n}{U_x} \right| - 1 \right) \right] \% \quad (9)$$

где U_n – номинальное значение или предел измерения прибора.

Таким образом, для установления класса точности ЦВ по экспериментально полученным значениям составляющих погрешности необходимо найти: приведенные значения составляющих аддитивной погрешности и их суммарное значение, а также относительные значения составляющих мультипликативной погрешности и их суммарное значение.

1. По результатам измерений найти и занести в таблицу 5 значения составляющих аддитивной погрешности:

1) по данным таблицы 2 найти значение абсолютной погрешности Δt_c , обусловленной нестабильностью во времени t_0 и t_3 (при $t_3=t_0$ эта погрешность была бы равна нулю, т.к. t_3 компенсирует t_0):

$$\Delta t_c = t_0' - t_3',$$

(в этом и последующих выражениях для параметра со штрихом брать значения из таблицы 2, полученные после выполнения п.5 опыта 3), а также ее приведенное значение:

$$\gamma_c = (\Delta t_c / t_{хн}) 100\%,$$

где $t_{хн}=t_{хр}$ при $U_x=U_n$ (см. таблицу 3).

2) из таблицы 3 найти максимальное значение абсолютной погрешности $\Delta t_{пм}$, обусловленной нестабильностью порога срабатывания СУ и по нему определить приведенное значение:

$$\gamma_{п} = (\Delta t_{пм} / t_{хн}) 100\%;$$

3) по параметрам макета ЦВ (табл.1) найти приведенное значение погрешности квантования, определяемое как:

$$\gamma_k = \pm (\Delta U_k / U_n) 100\% \quad \text{или} \quad \gamma_k = \pm (1/N_n) 100\% ;$$

4) найти суммарное приведенное значение аддитивной погрешности, определив его как среднеквадратичное значение:

$$\gamma_a = \sqrt{\gamma_k^2 + \gamma_c^2 + \gamma_n^2}$$

Таблица 5.

составляющие аддитивной погрешности	Δt_c , мкс	γ_c , %	$\Delta t_{пм}$, мкс	γ_n , %	γ_k , %	γ_a , %
значения						

2. Произвести вычисления и занести в таблицы 6 значения составляющих мультипликативной погрешности:

1) по данным таблицы 2 найти значения абсолютной ΔK_t и относительной δ_{kt} погрешности, обусловленной нестабильностью крутизны пилообразного напряжения:

$$\Delta K_t = K_{tk}' - K_{tk} \quad \text{и} \quad \delta_{kt} = (\Delta \hat{E}_t / K_{tk}) 100\%;$$

2) аналогично по данным таблицы 2 найти значения погрешности, обусловленной нестабильностью частоты ГКИ:

$$\Delta f_o = f_o' - f_o \quad \text{и} \quad \delta_f = (\Delta f_o / f_o) 100\%;$$

3) из таблицы 3 найти максимальное значение относительной погрешности нелинейности δ_{Hm} ;

4) найти суммарное относительное значение мультипликативной погрешности, определив его аналогично аддитивной:

$$\delta_M = \sqrt{\delta_{kt}^2 + \delta_f^2 + \delta_{Hm}^2};$$

5) по значениям γ_a и δ_M найти значения с и d класса точности, выбрав их после вычисления из ряда чисел, рекомендованных ГОСТом.

Таблица 6.

составляющие	ΔK_t ,	δ_{kt} ,	Δf_o ,	δ_f ,	δ_{Hm} ,	δ_M ,	с,	d,
--------------	----------------	-----------------	----------------	--------------	-----------------	--------------	----	----

мультипликативно й погрешности	мкс/В	%	кГц	%	%	%	%	%
значения								

3. По полученным значениям s и d , пользуясь выражением (9), найти значения допустимой погрешности δ_d макета для напряжений U_x , указанных в таблице 4, и занести в эту таблицу.

По данным таблицы 4 в одних координатах построить зависимости $\delta_d=f(U_x)$, $\delta_1=f(U_x)$ и $\delta_y=f(U_x)$. Сопоставить предельную погрешность, определяемую классом точности с экспериментальными.

Содержание отчета

В отчете привести схему рисунка 1; временные диаграммы, снятые в опыте 1; таблицы с результатами измерений и вычислений; графики, указанные в п. 6 опыта 3 и п. 3 раздела 3.

Контрольные вопросы

Принцип действия, устройство, работа и свойства ЦВ с временным преобразованием. Основные узлы ЦВ, требования к ним и принципы построения. Источники и причины возникновения погрешностей. Экспериментальное определение составляющих погрешности: методика и требования к аппаратуре. Нормирование погрешности ЦВ и определение его класса точности.

Литература

1. Кончаловский В.Ю. Цифровые измерительные устройства. -М.: Энергоатомиздат, 1985, с.159-162.
2. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы. -К.: Вища шк., 1986, с.418-421.
3. Шляндин В.М. Цифровые измерительные устройства. -М.: Высшая школа, 1981, с.185-194.

4. Фролкин В.Т., Попов Л.Н. Импульсные устройства. -М: Советское радио, 1980, с.235-265.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛЬТМЕТРА ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Цель работы

1. Изучение принципа действия и устройства преобразователя напряжения в частоту (ПНЧ).
2. Исследование погрешности, возникающей при воздействии помехи, и условий помехозащищенности вольтметра частотного преобразователя.

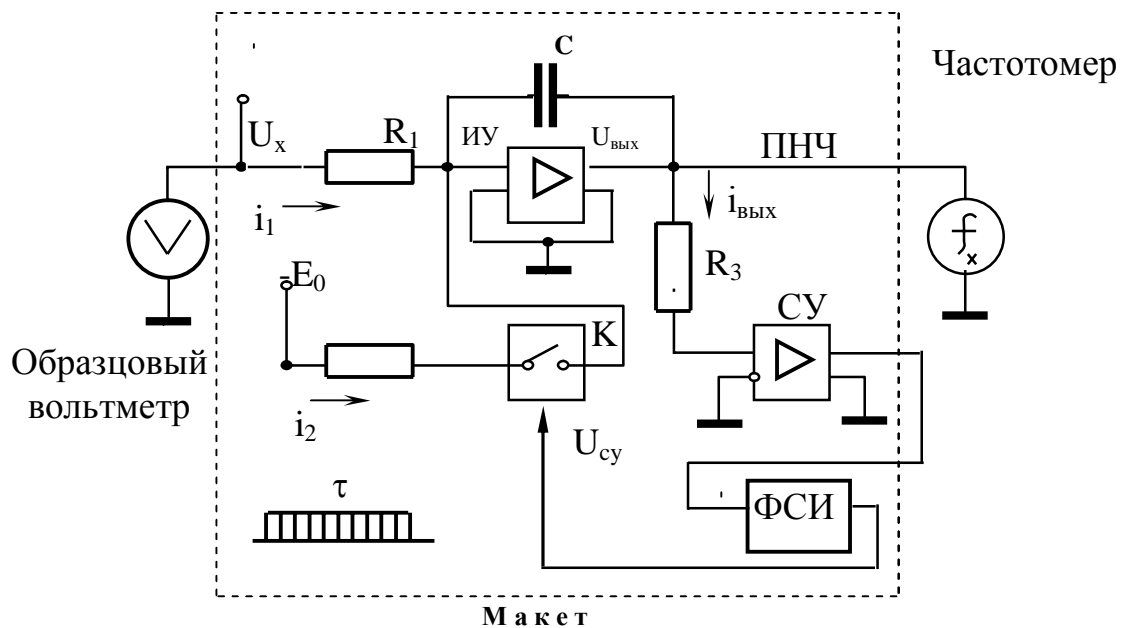
1 Принцип действия ПНЧ

В работе исследуется цифровой вольтметр с частотным преобразователем, который состоит из ПНЧ и цифрового частотомера. Упрощенная схема ПНЧ показана на рисунке 1.

1.1 Вывод уравнения характеристики ПНЧ

Рассмотрение принципа действия ПНЧ начнём с момента Б (рисунок 2). В этот момент ключ К (рисунок 1) размыкается, на вход интегрируемого усилителя (ИУ) поступает только ток i_1 (рисунок 2а), который имеет положительную полярность, поэтому выходной ток этого усилителя $i_{\text{вых}}$ уменьшается (рисунок 2в). В момент В, когда ток $i_{\text{вых}}$ станет равным нулю, сравнивающее устройство СУ выдаёт импульс, запускает формирователь строб-импульса (ФСИ), который выдаёт строб-импульс длительностью $\tau = \text{const}$. Строб-импульс замыкает ключ К, через который начинает проходить отрицательный ток $-i_2$ (рисунок 2б) от источника образцового напряжения $-E_0$. Начиная с момента В на интегрирующий

усилитель ИУ прохоят сумма токов $i_1 - i_2$, которая имеет отрицательную полярность, т.к. $i_2 > i_1$, поэтому ток $i_{\text{ВЫХ}}$ на выходе ИУ увеличивается.



М а к е т

Рисунок 1

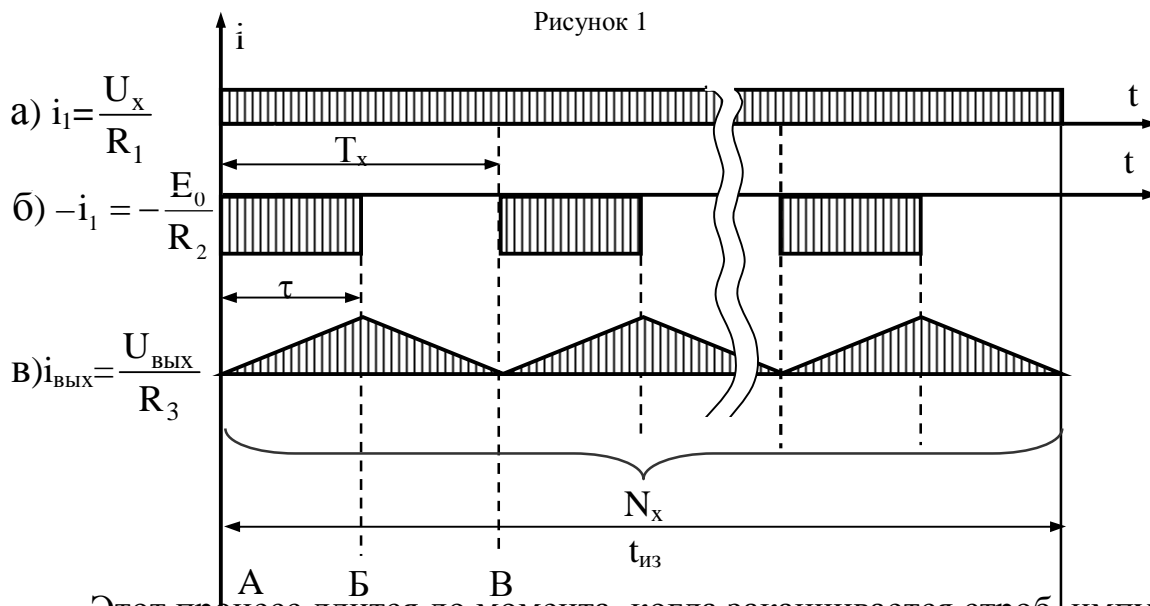


Рисунок 2

Этот процесс длится до момента, когда заканчивается строб-импульс длительностью τ , и ключ K , управляемый строб-импульсом, размыкается. Поэтому отрицательный ток $-i_2$ отключается, выходной ток ИУ начинает уменьшаться и процесс повторяется. В результате на выходе ИУ возникает периодическое напряжение (рисунок 2в). Число периодов за время измерения равно N_x . Определим частоту выходного напряжения ИУ.

Интеграл от входного тока – это сумма амперсекундных площадей токов i_1 и i_2 , которые имеют противоположные знаки (на рисунках 2а, 2б

эти площади показаны штриховкой). Приравняв амперсекундные площади токов i_1 и i_2 за время измерения, получим:

$$\int_0^{t_{\text{изм}}} \frac{U_x}{R_1} dt = \frac{E}{R_2} \tau N_x;$$

откуда следует:

$$U_{\text{хср}} = \frac{R_1}{R_2} E_0 \tau \frac{N_x}{t_{\text{изм}}} = \frac{R_1}{R_2} E_0 \tau f_x \quad (1-1)$$

где $U_{\text{хср}} = \frac{1}{t_{\text{изм}}} \int_0^{t_{\text{изм}}} U_x dt$ – среднее значение напряжения U_x за время измерения $t_{\text{изм}}$;

$$f_x = \frac{N_x}{t_{\text{изм}}} \text{ – частота напряжения на выходе ПНЧ.}$$

Из (1-1) видно, что частота ПНЧ f_x пропорциональна среднему значению входного напряжения $U_{\text{хср}}$ при условии постоянства параметров R_1 , R_2 , E_0 и τ . Стабильность первых трёх параметров определяется их паспортными данными, а постоянство τ (временной промежуток АБ, рисунок 2), обеспечивается схемой ФСИ.

На выход ПНЧ включают частотомер, который подсчитывает число периодов N_x за постоянное время измерения $t_{\text{изм}} = \text{const}$ и калибруется в значениях напряжения U_x .

1.2 Анализ формы выходного напряжения ПНЧ

Из уравнения (1-1) при $R_1 = R_2$ определим

$$\frac{U_x}{E_0} = \frac{\tau}{T_x} \quad (1-2)$$

При $U_x = U_{\text{хн}}$ ($U_{\text{хн}}$ – номинальное значение напряжения U_x)

$$\frac{U_{\text{хн}}}{E_0} = \frac{\tau}{T_{\text{хн}}} = a; \quad (1-3)$$

где a определяет отношение длительности τ первой половины периода $T_{\text{хн}}$ к полному периоду. Величина $a = \text{const}$, как видно из уравнения (1-3), и всегда удовлетворяет условию $a < 1$.

Параметры выходного напряжения T_x и $U_{\text{ВЫХ}}$ (график Б, таблица 1) при любом измеряемом напряжении U_x можно выразить через величины $T_{\text{ХН}}$ и $U_{\text{ВЫХ Н}}$, соответствующие напряжению $U_{\text{ХН}}$ (график А, таблица 1).

Выходное напряжение интегрирующего усилителя $U_{\text{ВЫХ}}$ в первом такте преобразования (между точками А–Б, рисунок 2) пропорционально напряжению $E_0 - U_x$ на входе усилителя. Следовательно:

$$\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ Н}}} = \frac{E_0 - U_x}{E_0 - U_{\text{ХН}}} = \frac{1 - \frac{U_x}{E_0}}{1 - \frac{U_{\text{ХН}}}{E_0}} = \frac{1 - ak}{1 - a}.$$

Откуда

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ Н}} \frac{1 - ak}{1 - a}; \quad (1-4)$$

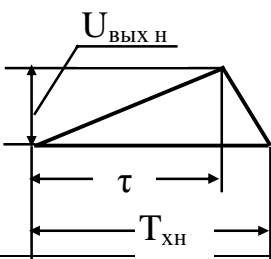
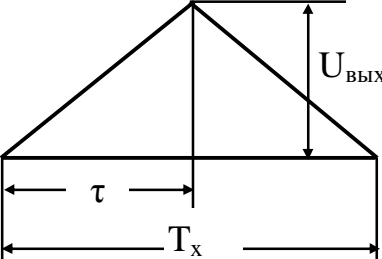
$$\text{где } k = \frac{U_x}{U_{\text{ХН}}}. \quad (1-5)$$

Из (1-2) и (1-3) получим:

$$T_x = T_{\text{ХН}} \frac{U_{\text{ХН}}}{U_x} = \frac{T_{\text{ХН}}}{k}. \quad (1-6)$$

Параметры T_x и $U_{\text{ВЫХ}}$ определяются через $T_{\text{ХН}}$ и $U_{\text{ВЫХ Н}}$ уравнениями (1-6) и (1-4).

Таблица 1

А)			Б)					
								
Результаты измерений при $U_{\text{ХН}}$ (дел.)			Значения параметров при U_x (дел.)					
			Вычисленное				Измеренное	
$T_{\text{ХН}}$	τ	$U_{\text{ВЫХ Н}}$	a	k	T_x	$U_{\text{ВЫХ}}$	T_x	$U_{\text{ВЫХ}}$

Опыт 1. Изучение схемы ПНЧ и формы напряжения на выходе ИУ

1. Изучить принцип действия ПНЧ и его схему (раздел 1).
2. Ознакомиться с лабораторным макетом и его органами управления.
3. Включить макет, осциллограф и приборы, с помощью которых будут выполняться измерения в данном и последующих опытах для прогрева.
4. Чтобы исключить воздействие помехи на ПНЧ, установить в нулевое положение ручку УРОВЕНЬ $U_{\text{п}}$.
5. С помощью осциллографа ознакомиться с процессами частотного преобразования, наблюдая осциллограммы в контрольных точках схемы ПНЧ, выведенных на переднюю панель прибора. Для синхронизации наблюдаемых процессов с частотой развёртки использовать внешнюю синхронизации осциллографа от сигналов, получаемых с гнезда « f_x » макета.
6. Выполнить калибровку ПНЧ. Для этого установить входное напряжение ПНЧ (гнездо « U_x ») по образцовому вольтметру V равным 10,000 В. Регулируя коэффициент преобразования ПНЧ ручкой КРУТИЗНА макета, по цифровому частотомеру, работающему в автоматическом режиме, установить на выходе ПНЧ частоту $f_x=10000$ Гц. Время измерения частотомера выбрать таким, чтобы его погрешность квантования не превышала погрешности образцового вольтметра. В таком случае по частотомеру можно непосредственно отсчитывать значения измеряемого напряжения, пренебрегая погрешностью преобразования.
7. Установить номинальное значение напряжения $U_{\text{хн}}$ и измерить в делениях экрана осциллографа значения $T_{\text{хн}}$, τ и $U_{\text{вых н}}$ в соответствии с графиком А (таблица 1). Результаты эксперимента А внести в таблицу 1. По полученным данным построить график напряжения $U_{\text{вых н}}$, состоящий из нескольких периодов.
8. Для одного их значений $U_x=3,4,5,6,7,8$ В, заданного преподавателем, рассчитать параметры a и k , а также, показанные на

графике Б (таблица 1), значения T_x и $U_{\text{вых}}$, соответственно по формулам (1–3), (1–5), (1–6) и (1–4).

По рассчитанным параметрам $T_{\text{хн}}$ и $U_{\text{вых}}$ и измеренному значению τ нарисовать график напряжения, подобный показанному в таблице 1, Б, состоящий из нескольких периодов.

9. Включить заданное преподавателем напряжение U_x и измерить в делениях экрана параметры T_x и $U_{\text{вых}}$, показанные в таблице 1, Б. Полученные результаты внести в таблицу 1 и сравнить с расчётными данными, а также сравнить форму напряжения на экране осциллографа с нарисованной.

2. Методика аналитического и экспериментального исследования влияния помехи на погрешность измерения

Показания вольтметра частотного преобразования согласно (1-1) пропорциональны среднему значению напряжения U_x за время измерения. При наличии помехи среднее значение U_x и $U_{\text{п ср}}$ будут складываться, поэтому результат измерения $U_{\text{изм}}$ будет равен сумме указанных составляющих:

$$U_{\text{изм}} = U_x \pm U_{\text{п ср}} \quad (2-1)$$

Если за время измерения проходит целое число периодов помехи ($U_{\text{п ср}}=0$), как следует из (2-1) $U_{\text{изм}}=0$, т.е. погрешности измерения от влияния помехи не будет.

На основе выполнения этого условия создаются помехозащищённые вольтметры частотного преобразования, у которых погрешность от помехи отсутствует.

2.1 Определение уравнений для погрешности при нецелом числе периодов помехи за время измерения

При нецелом числе периодов за время измерения $U_{\text{п ср}}$ будет представлять собой абсолютную погрешность $\Delta_{\text{п}}$, что легко показать, используя (2-1):

$$\Delta_{\text{п}} = U_{\text{изм}} - U_x = \pm U_{\text{п ср}} \quad (2-2)$$

Поэтому для оценки абсолютной погрешности Δ_{Π} , необходимо определить среднее значение напряжения помехи $U_{\Pi \text{ ср}}$ за время измерения $t_{\text{изм}}$. Среднее значение помехи определяется интегралом от заштрихованных площадей на рисунке 3а.

Для определения $U_{\Pi \text{ ср}}$ время измерения $t_{\text{изм}}$ разбиваем на участки t_1 и t_2 , содержащие соответственно целое число периодов и нецелую часть периода.

Введём обозначения:

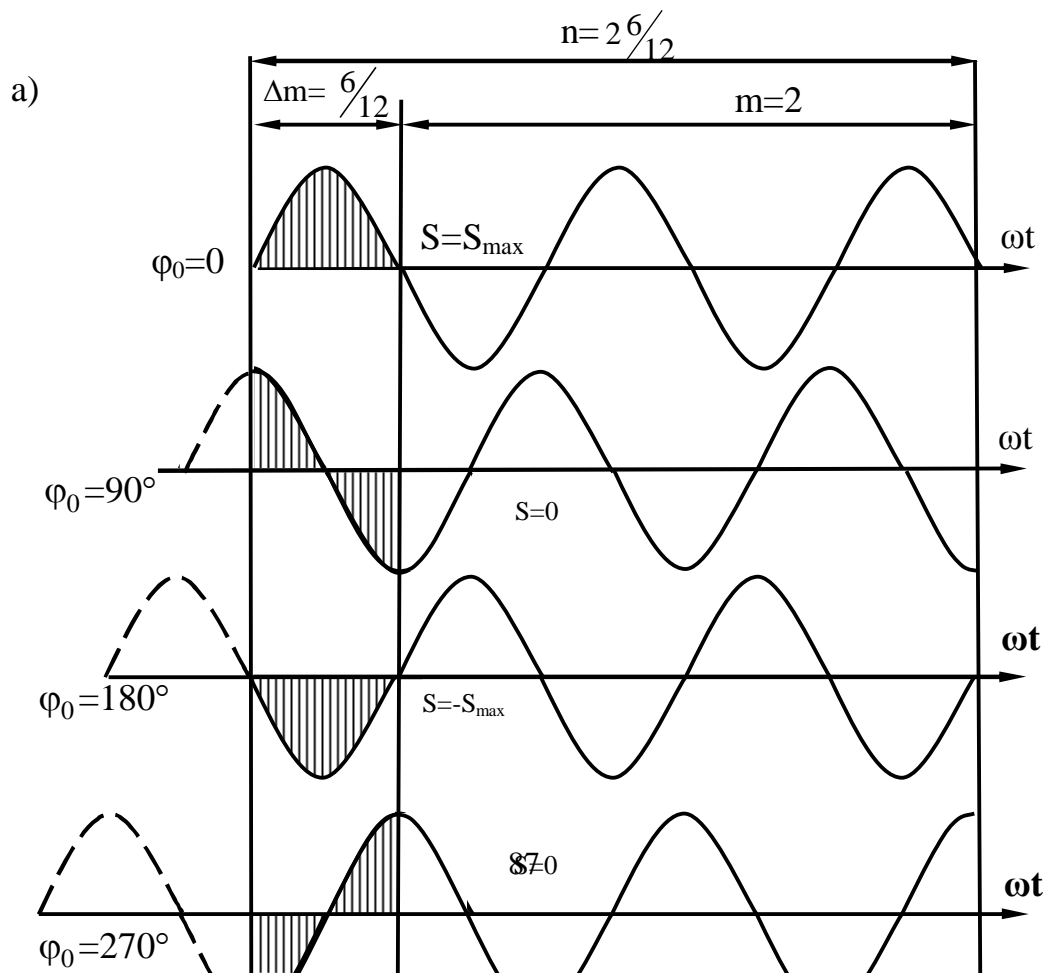
$n = \frac{t_{\text{изм}}}{T_{\Pi}} = m + \Delta m$ – число периодов за время измерения;

$m = \frac{t_1}{T_{\Pi}}$ – число целых периодов за время измерения;

$\Delta m = \frac{t_2}{T_{\Pi}}$ – нецелая часть периода помехи.

Величина n не обязательно целое число.

Как видно на рисунке 3а среднее значение $U_{\Pi \text{ ср}}$, зависит от начального фазового сдвига φ_0 напряжения помехи (для данного примера при $\varphi_0 = 90^\circ$ величина $U_{\Pi \text{ ср}} = 0$, а при $\varphi_0 = 0$ достигает максимального значения).



Среднее значение помехи определяется уравнением

$$\Delta_{\Pi} = U_{\Pi \text{ ср}} = \frac{U_a S}{n}; \quad (2-3)$$

где U_a – амплитудное значение помехи;

S – интеграл вдоль отрезка Δm , равный сумме заштрихованных площадей.

В дальнейшем временные отрезки t_1 , t_2 , и $t_{\text{изм}}$ будем выражать количеством периодов помехи T_n , т.е. величинами соответственно m , Δm , n .

Так как $U_{\Pi \text{ ср}}$ согласно (2–3) пропорционально интегралу S , определим вначале уравнение для S , что позволит составить некоторое представление о зависимостях, характеризующих величину погрешности Δ_{Π} .

$$S = \int_{\varphi_0/2\pi_0}^{\varphi_0/(2\pi+\Delta m)} \sin 2\pi n \, dn = \frac{1}{\pi} \sin(\pi \Delta m) \sin(\varphi_0 + 180^\circ \Delta m).$$

Наибольшая величина интеграла $\pm S_{\text{max}}$ будет при $\sin(\varphi_0 + 180^\circ \Delta m) = 1$, т.е.

$$S_{\text{max}} = \pm \frac{1}{\pi} \sin \pi \Delta m \quad (2-4)$$

При постоянном Δm величину интеграла S можно представить уравнением

$$S = S_{\text{max}} \sin(\varphi_0 + 180^\circ \Delta m). \quad (2-5)$$

Из выражений (2-4) и (2-5) можно сделать следующие выводы:

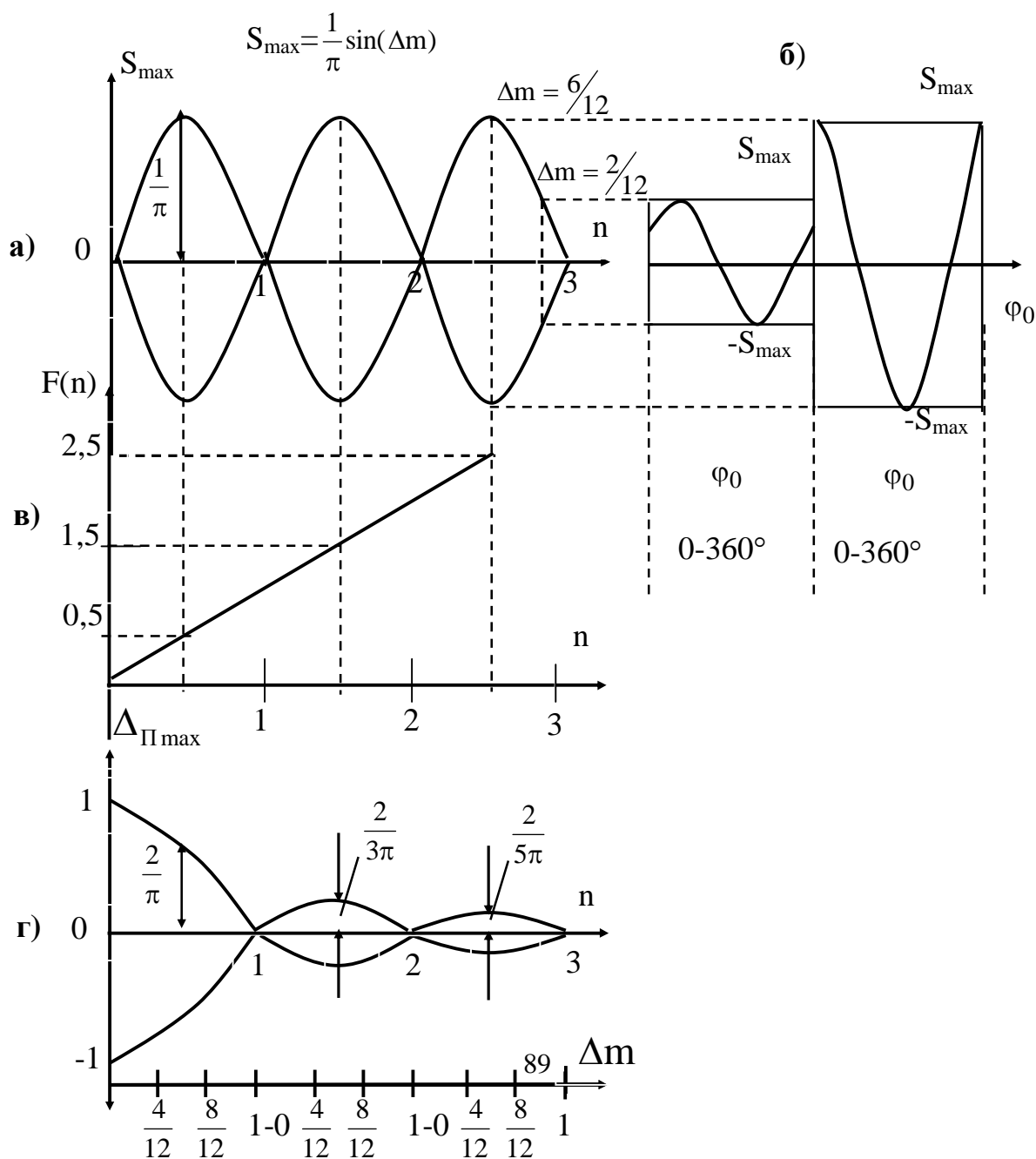
а) Величина $\pm S_{\text{max}}$ зависит только от Δm и может быть представлена графиком рисунка 4а для положительных и отрицательных

полярностей в промежутке, содержащем несколько периодов помехи (в каждом периоде значения Δm изменяются от 0 до 1).

б) При поддержании Δm постоянным интеграл S согласно (2-5) представляет синусоидальную функцию от аргумента φ_0 .

Амплитуда этой функции определяется величиной Δm . Функция $S(\varphi_0)$ для различных значений Δm представлена внутри прямоугольников (рисунок 4б), откуда видно, что значение S изменяется по синусоидальному закону в пределах от S_{\max} до $-S_{\max}$, причём величина S_{\max} зависит от Δm согласно (2-4).

Графики S для различных постоянных значений Δm представлены на рисунке 5. На этих графиках функции заключённые внутри прямоугольников (рисунок 4б), совмещены в одних координатных осях.



2.2 Методика экспериментального исследования погрешности от влияния помехи

При оценке величины погрешности наибольший интерес представляет её максимальное значение. Поэтому рассмотрим методику определения этой величины.

Максимальное значение погрешности найдём из уравнения (2-3):

$$\Delta_{\Pi \max} = U_{\Pi \text{cp}} = \frac{\pm U_a S_{\max}}{n}. \quad (2-6)$$

Для построения зависимости $U_{\Pi \text{cp}} = \Delta_{\Pi \max}$ от n используем график S_{\max} (рисунок 4а), ординаты которого будем делить на величину n , отложенную по горизонтальной оси. Для наглядности значения n отложим также и по вертикальной оси в другом масштабе, для сокращения размеров рисунка. Тогда получим линейную функцию $F(n)$ (рисунок 4в). выполнив деление ординат функции $S_{\max}(n)$ на $F(n)$, получим график максимальной погрешности $\Delta_{\Pi \max}(n) = U_{\Pi \text{cp}}(n)$, представленный на рисунке 4г, при $U_a = 1$.

Отметим особенность деления при n близком к нулю. В этом случае $n = \Delta m$ (т.к. $m=0$). Согласно (2-4) и (2-6):

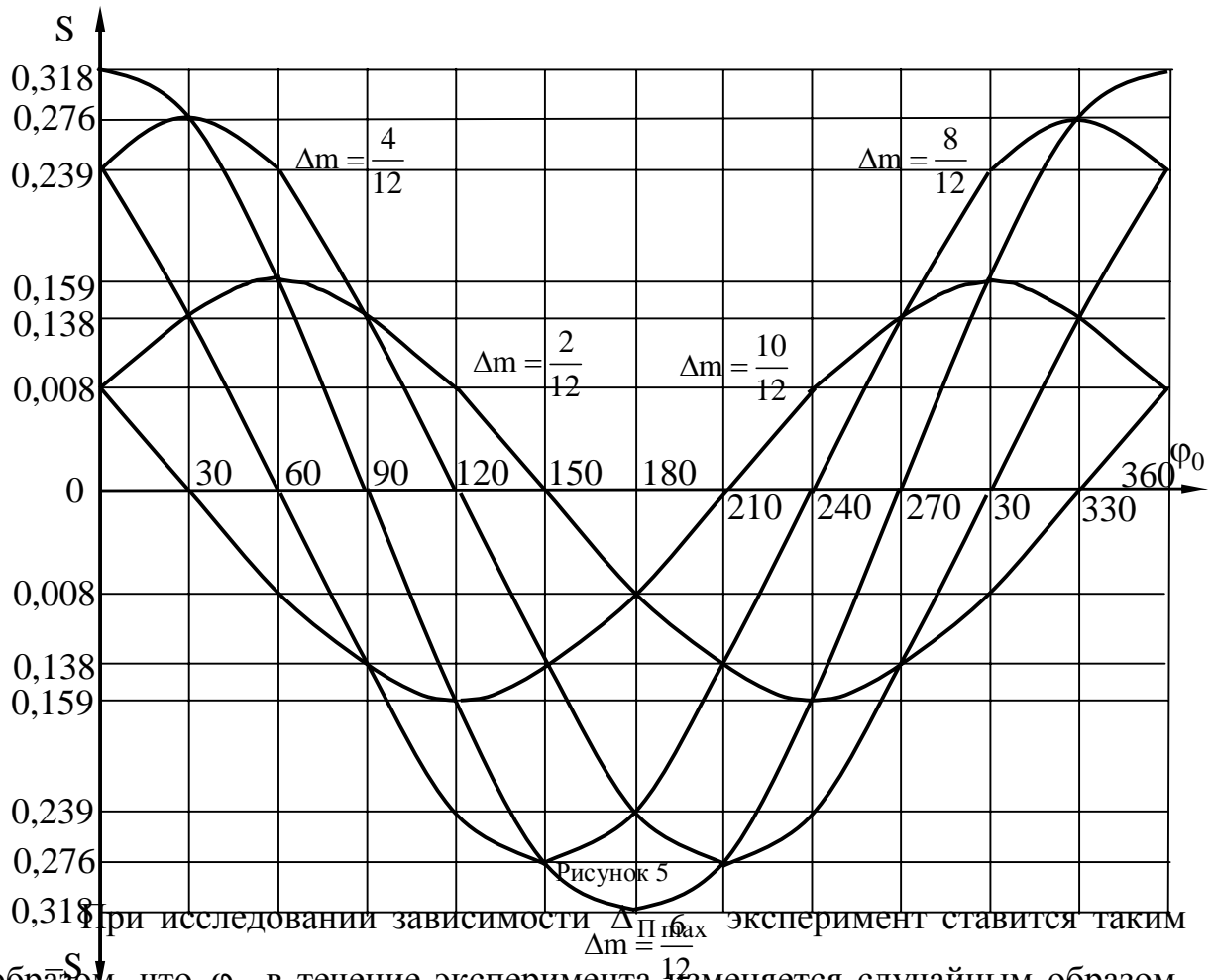
$$\Delta_{\Pi \max} = \pm U_a \frac{S_{\max}}{\Delta m} = \pm \frac{U_a \sin \pi \Delta m}{\pi \Delta m} \approx U_a \quad (2-7)$$

т.е. максимальная погрешность вблизи нулевого значения Δm равна амплитудному значению напряжения помехи U_a .

В данной работе требуется экспериментально исследовать две функции:

1) Максимальное значение погрешности $\Delta_{\Pi \max}$ в зависимости от n , определяемое уравнением (2-6) и приведённое на графике рисунка 4г.

2) Зависимость погрешности Δ_{Π} от φ_0 при заданном значении n , описываемую уравнениями (2–3) и (2–5). Интеграл S , входящий в уравнение (2-3) представлен графически на рисунках 4б и 5.



При исследовании зависимости $\Delta_{\Pi \max}$ эксперимент ставится таким образом, что φ_0 в течение эксперимента изменяется случайным образом. Тогда $\Delta_{\Pi} = U_{\text{Пср}}$ приобретает значения, которые на основании (2–3) и (2–5) можно описать уравнением:

$$\pm \Delta_{\text{Пср}} = \pm \Delta_{\Pi} = \frac{\pm U_a S}{n} = \frac{\pm U_a S_{\max}}{n} \sin(\varphi_0 + 180^\circ \Delta m).$$

Поэтому напряжение $U_{\text{изм}}$ в некоторые моменты будет приобретать максимальное значение:

$$U_{\max} = U_x + U_{\text{Пср}};$$

а в другие моменты уменьшается до минимума:

$$U_{\min} = U_x + U_{\text{Пср}}.$$

Вычитая из первого уравнения второе, получим

$$U_{\text{Пср}} = \Delta_{\Pi \max} = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2}. \quad (2-8)$$

Наблюдая показания вольтметра в течение 10-15 измерений можно получить отсчёты U_{\max} и U_{\min} и таким образом определить максимальную погрешность $\Delta_{\Pi\Theta\max}$ экспериментальным путём.

Для выполнения второго опыта аргумент φ_0 поддерживается неизменным, величина $U_{\text{Пср}}$ остаётся постоянной, и вычисляется по уравнению (2-2). Задавая значения φ_0 можно экспериментальным путём получить синусоидальную зависимость $U_{\text{Пср}}$ от φ_0 при постоянном n .

Отличие этих опытов состоит в том, что в первом случае аргумент φ_0 изменяется случайным образом и в некоторые моменты $U_{\text{Пср}}$ приобретает максимальное и минимальное значения, которые и являются предметом исследования.

Во втором случае значения φ_0 задаются и поддерживаются постоянными, что даёт возможность получить зависимость $U_{\text{Пср}}$ от начальной фазы помехи φ_0 .

Исследование $\Delta_{\Pi\max}$ можно выполнить по второму методу, но в этом случае нужно обеспечивать постоянство заданного значения φ_0 в диапазоне от 0 до 360° , что технически трудно реализовать. В лабораторном макете осуществляется постоянство φ_0 только для значений $0^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$.

При экспериментальных исследованиях используется макет вольтметра частотного преобразования с постоянным временем измерения $t_{\text{изм}}=10^{-2}$ с, а n равно $n=t_{\text{изм}}/T_{\Pi}$, осуществляется регулировкой периода помехи T_{Π} , для чего перестраивается частота генератора помехи. При заданной величине n периода T_{Π} и частота генератора определяется из уравнений:

$$T_{\Pi} = \frac{t_{\text{изм}}}{n}; \quad f = \frac{n}{t_{\text{изм}}}. \quad (2-9)$$

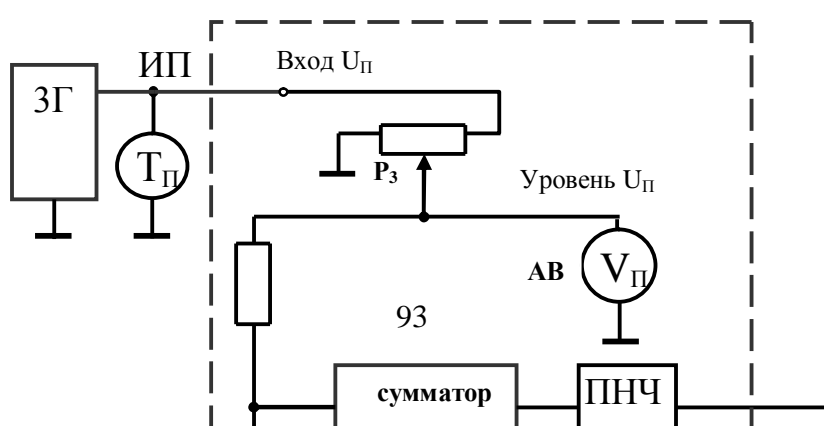
Опыт 2. Исследование зависимости максимальной погрешности из-за влияния помехи от числа периодов помехи за время измерения

Для выполнения опыта предназначена схема рисунок 6, где используется тот же макет, что в опыте 1, содержащий ПНЧ и сумматор на входе ПНЧ, суммирующий входное постоянное напряжение U_x и напряжение помехи U_{Π} . На макете имеются ручки Р1 и Р2 (ГРУБО и ТОЧНО) для регулировки напряжения U_x , величина которого измеряется образцовым вольтметром ОВ.

Напряжение помехи подаётся на ВХОД $U_{П}$ от звукового генератора 3Г, частота и амплитуда напряжения регулируются ручками, расположенными на панели 3Г, значение частоты и амплитуды напряжения отсчитываются по шкалам 3Г. Период помехи устанавливается по шкале частоты 3Г и уточняется по ЦОУ измерителя периода ИП. Соотношение между частотой и периодом помехи дано в таблице 2. На панели макета находится ручка P_3 дополнительной регулировки напряжения помехи, уровень помехи поступающей на сумматор измеряется амплитудным вольтметром АВ, расположенным на панели макета (рисунок 6).

На выход ПНЧ включается частотомер Ч, время измерения которого 10мс. Показания частотомера равны значению измеряемого напряжения в вольтах.

Аналитическая зависимость максимальной погрешности помехи $\Delta_{\Pi \max}$ от n характеризуется уравнением (2–6), а на рисунке 4г эта функция дана в графической форме. Исследование максимальной погрешности $\Delta_{\Pi \max}$ представляет практический интерес т.к. предельное значение погрешности является важной эксплуатационной характеристикой измерительного устройства.



Обозначим экспериментальную оценку максимальной погрешности через $\Delta_{\Pi \max}$, которая основана на определении максимального U_{\max} и минимального U_{\min} показаний частотомера Ч (рисунок 6). Максимальная погрешность $\Delta_{\Pi \max}$, найденная по экспериментальным данным U_{\max} и U_{\min} , вычисляется из уравнения (2-8).

Характеристики $\Delta_{\Pi \max}(n)$ и $\Delta_{\Pi \Xi \max}(n)$ определяются при значениях n , от $n=0$ до $n=3$ для аналитического значения погрешности $\Delta_{\Pi \max}$ и от $n=\frac{1}{3}$ до $n=3$ при экспериментальном определении той же погрешности, обозначенной через $\Delta_{\Pi \Xi \max}$. Значения n при расчёте и эксперименте задаются с дискретностью, равной $\frac{2}{12}$, как показано в таблице 2.

Опыт выполняется в такой последовательности:

1. По заданным значениям $n=\Delta m+m$ определить Δm и занести в таблицу 5.
2. Зная Δm , найти величину S_{\max} по формуле (2-4) или из графика рисунка 5 и занести в таблицу 2.
3. Вычислить $\Delta_{\Pi \max}$ по формуле (2-6) и результаты занести в таблицу 2. При этом следует иметь в виду, что при $n=0$, абсолютная погрешность $U_{\Pi \text{ср}}$ будет равна заданному значению напряжения помехи U_{Π} , как показано на рисунке 4г, что вытекает из раскрытия неопределённости в уравнении (2-7).

Таблица 2

 $U_n =$ В

$n = \frac{t_{изм}}{T_{\Pi}}$	$f_{\Pi}, \Gamma_{Ц}$	$T_{\Pi} = \frac{1}{f_{\Pi}} \text{ мс}$	Δm	S_{max}	$\Delta_{n \max}$	$U_{max}, \text{ В}$	$U_{min}, \text{ В}$	$\Delta_{ПЭ \max}$
0	-	-	0	-	U_{Π}	-	-	-
$\frac{4}{12}=0,333$	33,3	30,0						
$\frac{6}{12}=0,500$	50	20,0						
$\frac{8}{12}=0,667$	66,7	15,0						
1,0	100,0	10,0		0				
$1 \frac{4}{12}=1,333$	133,3	7,50						
$1 \frac{6}{12}=1,500$	150,0	6,67						
$1 \frac{8}{12}=1,667$	166,7	6,00						
2,0	200,0	5,00		0				
$2 \frac{4}{12}=2,333$	233,3	4,29						
$2 \frac{6}{12}=2,500$	250,0	4,00						
$2 \frac{8}{12}=2,667$	266,7	3,75						
3,0	300,0	3,33		0				

4. Для экспериментального определения максимальной погрешности $\Delta_{ПЭ \max} = U_{П \max}$ тумблер на панели частотомера переключить в автоматический режим работы. При этом будет отключена синхронизация запуска частотомера и начальная фаза помехи φ_0 будет случайной величиной.

5. По образцовому вольтметру ОВ (рисунок 6) установить заданное значение напряжения U_x на входе ПНЧ.

6. Установить заданное значение U_{Π} по вольтметру АВ (рисунок 6).

7. Чтобы задать величину n , выбирают нужное значение частоты

$f_{\Pi} = \frac{1}{T_{\Pi}}$ генератора 3Г по таблице 2, где даны значения f_{Π} и T_{Π}

вычисленные предварительно. Вначале установить частоту f_{Π} , а затем

подстроить её более точно, так, чтобы показание измерителя периода ИП помехи T_{Π} соответствовало величине T_{Π} данной в таблице 2.

8. Наблюдая по цифровому отсчётному устройству частотомера 10-15 измерений, выделить максимальные и минимальные показания U_{\max} и U_{\min} и занести их в таблицу 2.

9. Вычислить величину максимальной погрешности $\Delta_{\Pi\text{Э}\max}$, подставив значения U_{\max} и U_{\min} в формулу (2-8), и результаты вычисления занести в таблицу 5.

10. По расчётным значениям $\Delta_{\Pi\max}$, полученным в п. 3, построить график $\Delta_{\Pi\max}(n)$, откладывая величины $\Delta_{\Pi\max}$ в положительную и отрицательную стороны, как показано на рисунке 4г.

11. На полученный график нанести величины $\Delta_{\Pi\text{Э}\max}$ и, таким образом, сравнить расчётные значения $\Delta_{\Pi\max}$ с определёнными экспериментально погрешностями $\Delta_{\Pi\text{Э}\max}$.

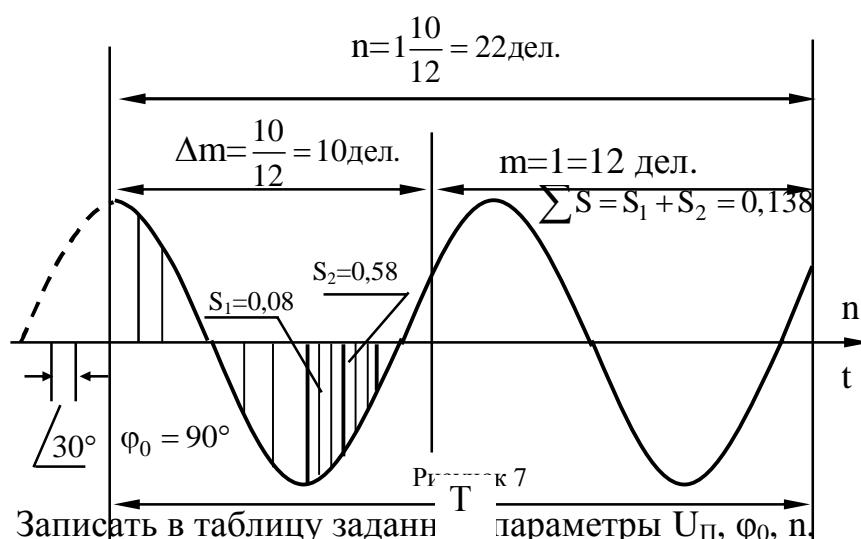
Опыт 3. Исследование зависимости погрешности, вызванной влиянием гармонической помехи, от начальной фазы помехи

А. Практическая часть. В процессе практического анализа требуется рассмотреть природу воздействия помехи и причину появления погрешности в результате этого воздействия. С этой целью проводится построение временной характеристики напряжения помехи. Для начального фазового сдвига φ_0 , заданного преподавателем.

Последовательность действий поясняется примером построенного графика (рисунок 7) и данными внесёнными в таблицу 3. задание выполняется в такой последовательности:

Таблица 3

Заданные параметры			Вычисленные параметры				
$U_{\Pi}, \text{В}$	φ_0°	n	Δm	m	$\sum S$	S	$\Delta_{\Pi} = U_{\text{пер}}, \text{В}$
4	90°	$1\frac{10}{12} = 22/12$	$10/12$	1	0,138	0,138	$\frac{4 \cdot 0,138}{22/12} = 0,3$



1. Записать в таблицу заданные параметры U_{Π} , φ_0 , n .
2. Вычислить Δm и m . Полученные значения внести в таблицу 3.
3. Построить график $U_{\Pi}(t)$ в соответствии с заданными величинами.

При построении период делить на 12 частей, тогда углу $\varphi_0 = 90^\circ$ будет соответствовать 3 деления. А величине $\Delta m = \frac{10}{12} = 10$ дел. Вначале

пунктиром нарисовать один период синусоиды и на графике отметить значение φ_0 . затем по горизонтальной оси отложить величины Δm и m и сплошной линией продолжить синусоиду вдоль этих участков.

4. Определить значение интеграла S . Из построения (рисунок 7) видно, что на участке Δm слева расположены по 3 сектора, а справа по одному сектору противоположной полярности, которые компенсируются. Нескомпенсированными остаются два сектора, S_1 и S_2 показанные штриховкой, эти сектора и будут определять значение интеграла.

Величины интегралов этих секторов даны на рисунке 3б: $S_1 = 0,080$; $S_2 = 0,058$. Суммарный интеграл $\sum S = S_1 + S_2 = 0,138$. Затем определить S по графику рисунка 5. Должно выполняться условие $S = \sum S$. После этого вычислить величину $U_{\text{пер}} = \Delta_1$ по формуле (2-3). Величины $\sum S$, S , $U_{\text{пер}} = \Delta_{\Pi}$ внести в таблицу 3. Полученное значение Δ_{Π} сравнить с результатом эксперимента в таблице 4. построенный график показать преподавателю.

Б. Экспериментальная часть. В процессе эксперимента требуется определить зависимость абсолютной погрешности $\Delta_{\Pi} = U_{\text{Пср}}$ от начальной фазы φ_0 . Эта зависимость согласно (2–4) и (2–5), при постоянном Δm , носит синусоидальный характер и может быть представлена уравнением (2–3). Для выполнения эксперимента используется тот же макет, что и в предыдущих опытах.

Опыт выполняется в такой последовательности:

1. По заданному значению $n = \Delta m + m$ определить величину Δm . Для формирования заданного числа периодов n за время измерения вычислить частоту генератора помехи f_{Π} и период помехи T_{Π} при заданных n и времени измерения $t_{\text{изм}} = 10^{-2}$ с по формулам (2–9).

Эти величины также можно определить из таблицы 2. Найденные величины Δm , f_{Π} и T_{Π} и заданные значения U_x , n и U_{Π} внести в верхнюю часть таблицы 4.

2. Зная Δm , найти значение S для углов φ_0 , данных в таблице 4, по формуле (2–2) или по графику рисунка 5, величины S заносятся в таблицу 4. Значение S из таблицы 3 сравнить с соответствующей величиной из таблицы 4.

3. Вычислить по формуле (2-3) $U_{\text{Пср}} = \Delta_{\Pi}$ для углов φ_0 , указанных в таблице 4, по заданным значениям U_{Π} и n . Найденные величины занести в таблицу 4.

Таблица 4

$n =$;		$\Delta m =$;				$U_{\Pi} =$;		
$U_x =$;		$t_{\text{изм}} = 10 \text{мс};$		$f_{\Pi} =$;		$T_{\Pi} =$.		
φ_0		0	30	60	90	120	150	180
Данные расчёта	S							
	$U_{\text{Пср}} = \Delta_{\Pi}$							
Результаты эксперимента	$U_{\text{изм}}$							
	$U_{\text{Пср}} = \Delta_{\Pi Э}$							

4. Перевести тумблер на панели частотомера Ч (рисунок 5) в режим дистанционного (внешнего) запуска, а вход дистанционного запуска

частотомера соединить с гнездом ЗАПУСК макета. Это требуется для запуска измерения частотомера в момент, когда помеха на входе ПНЧ будет находиться в фазе, определяемой положением клавишного переключателя. Переключателем можно задавать начальный угол помехи равный 0° , 60° , 90° и 120° .

5. Переключатель времени измерения частоты на панели частотомера Ч установить в положение $t_{\text{изм}}=10^{-2}\text{с}$.

6. Установить по образцовому вольтметру ОВ значение входного постоянного напряжения U_x , величина которого задана преподавателем.

7. По вольтметру генератора помехи ЗГ установить его выходное напряжения равное 4–5В.

8. Ручкой УРОВЕНЬ U_{Π} по амплитудному вольтметру АВ, установить заданное значение U_{Π} .

9. Установить по шкале генератора помехи ЗГ рассчитанную величину частоты f_{Π} , и подстройкой частоты добиться, чтобы измеритель ИП периода помехи T_{Π} показал рассчитанное значение T_{Π} .

10. Последовательно включая $\varphi_0=0^\circ$, 60° , 90° и 120° с помощью клавишного переключателя измерить по частотомеру Ч выходную частоту ПНЧ. Показания частотомера равны напряжению $U_{\text{изм}}$, которое можно представить в соответствии с (2-1) уравнением

$$U_{\text{изм}} = U_x + U_{\text{Пср}} = U_x + \Delta_{\text{ПЭ}},$$

где $\Delta_{\text{ПЭ}}$ – абсолютная погрешность, найденная экспериментально. Полученное значение $U_{\text{изм}}$ занести в таблицу 4.

11. Определить $U_{\text{Пср}}=\Delta_{\text{ПЭ}}$ по формуле $\Delta_{\text{ПЭ}}=U_{\text{изм}} - U_x$ и результаты занести в таблицу 4, считать, что при $\varphi_0=180^\circ$, что величина $\Delta_{\text{ПЭ}}$ равна значению $\Delta_{\text{ПЭ}}$ при $\varphi_0=0^\circ$, но с противоположным знаком.

12. По расчётным данным Δ_{Π} полученным в п.3 данного опыта, построить график зависимости Δ_{Π} от φ_0 , на графике отложить значения $\Delta_{\text{ПЭ}}$, полученные на основе экспериментальных данных в п. 11.

13. Проанализировать полученный график, пояснить характер зависимости $\Delta_{\Pi}(\varphi_0)$.

Содержание отчёта

В отчёте привести схему ПНЧ и графики поясняющие его принцип действия (рисунки 1 и 2). Графики выходного напряжения ИУ при $U_{\text{хн}}$ и заданном $U_{\text{х}}$. График рисунка 7, построенный по заданным исходным данным. Графики относящиеся к опытам 2 и 3, таблицы 1, 2, 3, 4.

Контрольные вопросы

Принцип действия ПНЧ и вольтметра частотного преобразования с помощью схемы и графиков. Понятие о помехозащищенности вольтметра.

Характер зависимости погрешностей $\Delta_{\text{П}}$ и $\Delta_{\text{П max}}$ от φ_0 и n при нецелом числе периодов. Методика постановки экспериментов. Способ построения характеристики $U_{\text{П}}(t)$ (рисунок 7).

Литература

1. В.Н. Чинков. Цифровые измерительные приборы. Министерство обороны 1992 г.
2. Б.И. Швецкий. Электронные цифровые приборы. Киев, “Техника”, 1991 г.
3. К.С. Полулях. Методические указания к выполнению курсового проекта по курсу “Цифровые измерительные устройства”, Харьков, ХПИ, 1990 г.

Варианты заданий

1) $n=1 \frac{4}{12}$	$U_{\text{П}}=3\text{В}$	$U_{\text{х}}=4\text{В};$	$\varphi_0=60^\circ$
2) $n=1 \frac{6}{12}$	$U_{\text{П}}=3\text{В}$	$U_{\text{х}}=4\text{В};$	$\varphi_0=30^\circ$
3) $n=1 \frac{8}{12}$	$U_{\text{П}}=3\text{В}$	$U_{\text{х}}=4\text{В};$	$\varphi_0=0^\circ$.
4) $n=\frac{6}{12}$	$U_{\text{П}}=4\text{В}$	$U_{\text{х}}=5\text{В};$	$\varphi_0=60^\circ$.
5) $n=1 \frac{4}{12}$	$U_{\text{П}}=3\text{В}$	$U_{\text{х}}=4\text{В};$	$\varphi_0=90^\circ$.
6) $n=1 \frac{6}{12}$	$U_{\text{П}}=3\text{В}$	$U_{\text{х}}=5\text{В};$	$\varphi_0=60^\circ$.

7) $n=1\frac{8}{12}$	$U_{\Pi}=3\text{В}$	$U_x=5\text{В};$	$\varphi_0=30^\circ.$
8) $n=\frac{6}{12}$	$U_{\Pi}=3\text{В}$	$U_x=4\text{В};$	$\varphi_0=30^\circ.$
9) $n=\frac{4}{12}$	$U_{\Pi}=3\text{В}$	$U_x=6\text{В};$	$\varphi_0=60^\circ.$
10) $n=\frac{6}{12}$	$U_{\Pi}=3\text{В}$	$U_x=6\text{В};$	$\varphi_0=60^\circ.$
11) $n=\frac{8}{12}$	$U_{\Pi}=3\text{В}$	$U_x=6\text{В};$	$\varphi_0=0^\circ.$
12) $n=\frac{6}{12}$	$U_{\Pi}=3\text{В}$	$U_x=6\text{В};$	$\varphi_0=30^\circ.$

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Цель работы – ознакомление с методикой измерения статической и динамической погрешностей аналого–цифрового преобразователя (АЦП), а также изучение аппаратуры, предназначенной для определения этих погрешностей.

1 Методика определения статической погрешности АЦП

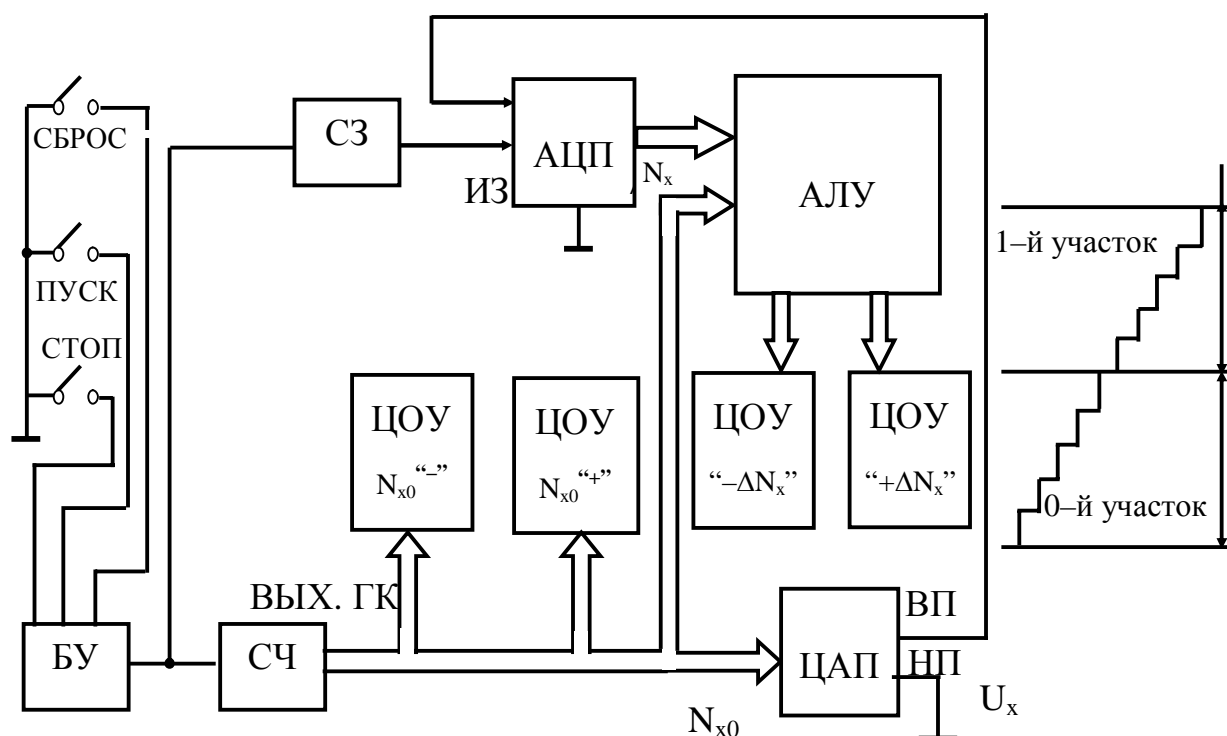
В работе исследуется статическая погрешность постоянного тока. **Статической называется погрешность**, возникающая при измерении напряжения неизменного по величине в течение времени измерения АЦП. Для измерения погрешности используется лабораторный макет, схема которого показана на рисунке 1. Блок управления БУ выдаёт последовательную серию импульсов на счётчик СЧ. Код счётчика поступает на вход цифроаналогового преобразователя (ЦАП), на выходе которого формируется равномерно–ступенчатое напряжение (рисунок 1), возрастающее на одну ступень при каждом новом импульсе от БУ. Выходное напряжение ЦАП, которое является образцовым напряжением, поступает на вход поверяемого АЦП.

Номинальное значение напряжения поверяемого АЦП и образцового напряжения на выходе ЦАП имеют одну и ту же величину $U_{\text{хн}}=10,24\text{В}$.

Код ЦАП имеет 11 двоичных разрядов, следовательно, число ступеней образцового напряжения равно $2^{11}=2048$, а величина ступени квантования – $0,005\text{В}$.

ЦАП, формирующий образцовое напряжение, имеет более высокий класс точности по сравнению с поверяемым АЦП, количество разрядов которого 10, а ступень квантования в два раза больше ступени ЦАП.

Запуск АЦП происходит при каждой новой ступени образцового напряжения.



Для этого импульс запуска U проходит через схему задержки СЗ и поступает на вход запуска АЦП после окончания переходного процесса установки нового значения образцового напряжения. Следовательно, в процессе поверки происходит 2048 измерений во всём диапазоне работы поверяемого АЦП.

После окончания работы АЦП полученный код N_x результата измерения образцового напряжения проходит на арифметико–логическое устройство (АЛУ). В АЛУ вводится также код номера ступени образцового напряжения N_{x0} , который поступает с выхода счётчика СЧ. С помощью

АЛУ вычисляется величина погрешности ΔN_x как разность кодов АЦП и ЦАП:

$$\Delta N_x = N_x - N_{x0}$$

Результат вычисления погрешности выдаётся через регистр и цифровое отсчётное устройство (ЦОУ), отмеченное знаком $+\Delta N_x$ в десятичной системе счисления.

Величина образцового напряжения U_x , при котором была получена данная погрешность, с выхода счётчика СЧ в виде номера ступени N_{x0} образцового напряжения поступает на дешифратор и цифровое отсчётное устройство, отмеченное знаком $N_{x0}+$. Номер ступени образцового напряжения выдаётся на ЦОУ, построенном на светодиодах, в виде 11-разрядного двоичного кода.

Так выдаётся информация при положительной погрешности ΔN_x . Если погрешность отрицательна, величина $-\Delta N_x$ и количество ступеней образцового напряжения, при котором получена данная погрешность, индицируются на аналогичных ЦОУ, отмеченных соответственно знаками $-N_x$ и $N_{x0}-$.

При последующих импульсах от БУ образцовое напряжение увеличивается на одну ступень и процесс повторяется.

Характер дальнейших операций зависит от соотношения результатов определения последней и предыдущей погрешности. Если величина последующей погрешности меньше или равна предыдущей, показания индикаторов остаются неизменными. При увеличении погрешности на индикаторы выдаются показания, соответствующие большей погрешности.

Таким образом, после измерений на всех 2048 уровнях образцового напряжения на индикаторах будут: значения наибольшей погрешности (положительной или отрицательной) и код номера ступени образцового напряжения, при котором получена эта погрешность.

2 Анализ погрешностей АЦП на отдельных участках диапазона

В работе требуется определить соответствие погрешностей АЦП допустимым величинам, определяемым паспортными данными прибора.

Из приведенного выше описания следует, что лабораторный макет даёт возможность определить, при каком напряжении N_x возникает наибольшая погрешность и её величину.

Однако, такой результат не всегда приемлем, так как требуется знать величину погрешности на разных участках, расположенных равномерно в рабочем диапазоне измеряемых напряжений.

Для более подробного анализа погрешности на передней панели лабораторного макета имеется кнопка СТОП, при нажатии которой прерывается процесс поверки АЦП при некотором номере ступеньки образцового напряжения. Поверка возобновляется при нажатии кнопки ПУСК.

В работе измерение наибольшей погрешности производится на восьми участках, обозначенные номерами 0, 1, ..., 7. следовательно, на каждом участке производится определение номера ступени образцового напряжения, при котором погрешность наибольшая, и её величину.

Число измерений на каждом участке $-2048/8=256$. После прохождения такого количества измерений необходимо нажать кнопку СТОП и выполнить считывание результатов исследования этого участка, затем исследование продолжить на следующем участке.

Момент нажатия кнопки СТОП определяется следующим образом. Так как на выходе ЦАП нет индикатора номера ступени U_x , используется ЦОУ на выходе АЦП, работающее в двоичном коде. Число разрядов АЦП и ЦАП отличается (соответственно 10 и 11), поэтому нужно установить соответствие кодов, сущность которого поясняется таблицей 1.

Таблица 1

11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	Номера разрядов ЦАП
1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1	Вес разряда кода ЦАП
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		Номера разрядов кода АЦП
1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2		Вес разряда кода АЦП
2^9	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0		Индикация на выходе АЦП

Так как номинальные напряжения ЦАП и АЦП одинаковы (10,24 В), веса их разрядов не отличаются, но количество разрядов АЦП на один разряд меньше, поэтому младший разряд АЦП имеет вес 2, а не 1.

А индикация на выходе АЦП (последняя строка таблицы 1) выполнена из расчёта, что вес младшего разряда 1. Покажем, каким образом следует учесть указанное несоответствие.

Исследуемый участок заканчивается в момент, когда проходит 256 ступеней образцового напряжения. При этом единица в коде АЦП переходит из 8-го разряда в 9-й. Из таблицы 1 следует, что в этот момент в индикаторе АЦП светодиод с обозначением 2^6 гаснет, а подсвечивается разряд с весом 2^7 . Поэтому для определения момента окончания поверки на данном участке напряжения U_x необходимо следить за состоянием светодиода с весом 2^6 и в момент его потухания и подсветки светодиода с весом 2^7 прервать измерение кнопкой СТОП.

3. Оценка соответствия АЦП паспортным данным

Для оценки соответствия точности поверяемого АЦП производится сравнение наибольшей погрешности на данном участке, полученной экспериментально с допустимой точностью. Экспериментально полученное значение погрешности $\delta_э$ не должно превышать величину допустимой погрешности $\delta_{доп}$.

Указанные погрешности вычисляются по формулам

$$\delta_э = \frac{\Delta N_x}{N_{x0}}; \quad (3-1)$$

$$\delta_{доп} = \pm \left[c + d \left(\frac{N_{хн}}{N_{x0}} - 1 \right) \right]; \quad (3-2)$$

где ΔN_x – погрешность, полученная экспериментально на ЦОУ лабораторного макета.

N_{x0} – номер ступени образцового напряжения, значение которого получают на соответствующем ЦОУ в 11 разрядном двоичном коде, который должен быть преобразован в десятичную систему.

$N_{хн}=2048$ – номинальное число ступеней образцового напряжения U_x .

d – приведенная аддитивная погрешность;

$c = \delta_m + d$ – сумма d и относительной мультипликативной погрешности δ_m .

Величины c и d являются паспортными данными прибора, их значение указывается на передней панели прибора.

Полученные результаты для наглядности должны быть представлены на графике. Для получения графика внутри каждого участка по горизонтальной оси откладывается число ступеней N_{x0} образцового напряжения U_x и соответствующие этому напряжению погрешности δ_3 и $\delta_{доп}$. Точки обозначающие $\delta_{доп}$ соединяются кривой, ограничивающей область допустимых погрешностей, как показано на графике (рисунок 2 а). Точки, обозначающие δ_3 отмечены звёздочками.

Значение $\delta_{доп}$ на графике необходимо откладывать на вертикальной оси в положительную и отрицательную стороны. Такое же построение делается для случая, когда образцовое напряжение U_x изменяет полярность на противоположную, тогда N_x откладывается в левую сторону. В результате графики допустимых погрешностей будут располагаться в четырёх квадрантах (рисунок 2а). Два левых квадранта показаны не полностью.

Так как диапазон изменения напряжения U_x составляет 2048 ступеней, построение графика при ограниченных размерах чертежа вызывает трудности. Этот процесс можно упростить, если использовать шестнадцатиричный код, который легко можно получить путём преобразования двоичного.

Способ преобразования двоичного кода в шестнадцатиричный покажем на примере таблицы 2. Для выполнения преобразования следует учесть, что разряд шестнадцатиричного кода содержит 4 двоичных разряда. Пусть на ЦОУ номера ступени образцового напряжения U_x получен 11–разрядный двоичный код: 00101011101.

а)

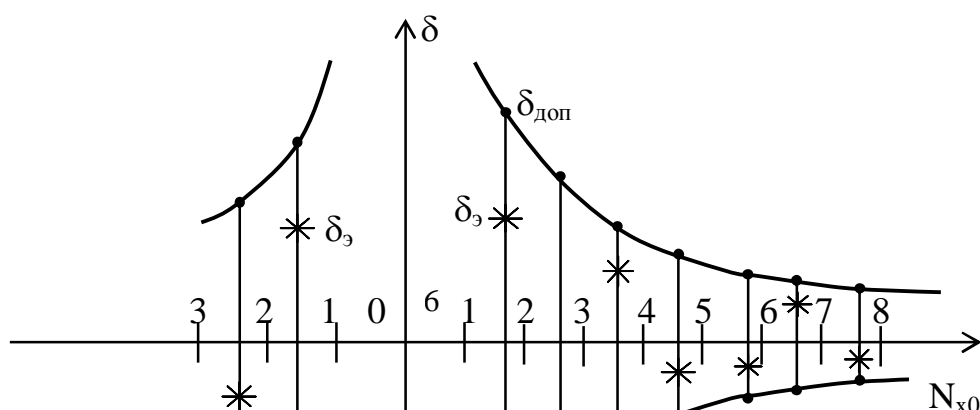


Рисунок 2

Таблица 2

Двоичный код	001	1010	1101
Вес единицы разряда шестнадцатиричного кода	$16^2=256$	16^1	16^0
Шестнадцатиричный код	1	5	D (13)
Наименование разрядов	ст.	ср.	мл.

Как показано в таблице 2, двоичный код разделяется на группы по 4 разряда, соответствующие младшему, среднему и старшему разрядам (в старшем разряде только 3 двоичных разряда).

Цифры в разрядах шестнадцатиричного кода определяется двоичным кодом данного разряда. Используются цифры от 0 до 9, для цифр больших 9 используются буквы:

10 – A;	12 – C;	14 – E;
11 – B;	13 – D;	15 – F.

Полученный шестнадцатиричный код (15D) в третьей строке таблицы 2.

В старшем разряде вес единицы данного разряда равен 256, что соответствует количеству ступеней выбранных участков. Поэтому цифра старшего разряда определяет точку на оси U_x (рисунок 2а), определяющую начало участка с соответствующим номером (в таблице 2 цифра 1).

Чтобы отложить по горизонтальной оси значения U_x , каждый участок разделим на 16 делений. Тогда цифра среднего разряда (в таблице 2 цифра А) будет определять количество делений. Одно деление будет равно 16 ступеням образцового напряжения ($256/16=16$).

Каждое деление разделим на 16 долей, тогда цифра младшего разряда (в таблице 2 цифра D) будет определять количество шестнадцатых долей, откладываемых по оси. Шестнадцатая доля деления будет равна одной ступени образцового напряжения ($16/16=1$).

На рисунке 2б показан пример нанесения координаты N_{x0} погрешности δ_9 , отмеченной звездочкой. Координата имеет код 19D (1 – начало первого участка, 9 – число делений, D – количество шестнадцатых долей). Из рисунка видно, что количество долей нанести затруднительно при малом формате чертежа, поэтому младший разряд можно представить приблизительно, а если это не удастся, им можно пренебречь, ограничившись двумя старшими разрядами шестнадцатиричного кода.

Для расчёта погрешностей δ_9 и $\delta_{доп}$ значение N_{x0} необходимо преобразовать из шестнадцатиричного кода в десятичный, что делается на основании уравнения

$$N_{x0-10}=256N_{ст} + 16N_{ср} + N_{мл}$$

где N_{x0-10} – десятичное значение двоичного числа N_{x0} ,

$N_{ст}$, $N_{ср}$ – цифры разрядов шестнадцатиричного кода.

Значения первого и второго слагаемых для упрощения расчётов даны в таблице 3 в зависимости от величин $N_{ст}$ и $N_{ср}$.

Таблица 3

Значение $N_{ст}$ или $N_{ср}=2\dots 8$	2	3	4	5	6	7	8
Произведение $256N_{ст}$	512	768	1024	1280	1536	1792	2048
Произведение $16 N_{ср}$	32	48	64	80	96	112	128

$N_{cp}=2...8$							
Значение N_{cp} или $N_{cp}=9...F(15)$	9	10 A	11 B	12 C	13 D	14 E	15 F
Произведение $16N_{cp}$ или $N_{cp}=9...F(15)$	144	160	176	192	208	224	240

Опыт 1. Измерение статической погрешности АЦП для определения его соответствия паспортным данным

Перед выполнением опыта изучить методику измерения статической погрешности и работу лабораторного макета, изложенные в разделе 1, 2 и 3. Ознакомиться с расположением элементов структурной схемы устройства (рисунок 1) и органов управления.

Для выполнения опыта собрать схему (рисунок 1). Для этого необходимо соединить разъем входного кабеля ЦАП с выходом счётчика, формирующего 11-разрядный код номера ступени образцового напряжения U_x и выполняющего роль генератора кода (ГК). Выход счётчика выведен на панель макета и имеет обозначение Вых. ГК. Выход ЦАП – зажимы ВП и НП (высокий и низкий потенциал) – соединить с гнездами ВХ. АЦП макета.

Лабораторный макет может работать в двух режимах: исследование статической и динамической погрешностей.

Режимы переключаются тумблером РЕЖ. Для измерения статической погрешности тумблер установить в положение СТАТ.

Опыт выполняется в определенной последовательности.

1. После сборки схемы включить питание макета и ЦАП, дать им прогреться 10-15 мин.

2. Запустить работу макета на нулевом участке диапазона U_x . Для этого вначале нажать кнопку СБРОС для приведения схемы в исходное состояние. Затем запустить лабораторный макет для измерения погрешности нажатием кнопки ПУСК.

После того как будет выполнено 256 измерений и, следовательно,

закончится работа на нулевом участке процесс измерения прервать нажатием кнопки СТОП.

Кнопку СТОП следует нажимать в тот момент, когда на выходном двоичном индикаторе АЦП погаснет светодиод с обозначением 2^6 и подсветит следующий разряд с обозначением 2^7 , как было пояснено в разделе 2.

2. После прерывания измерений на нулевом участке на ЦОУ погрешностей будут иницироваться максимальные значения абсолютной погрешности $+\Delta N_x$ и $-\Delta N_x$. Из двух значений погрешности (положительной и отрицательной) занести в таблицу 3 большую по модулю величину погрешности ΔN с её знаком.

Затем в таблицу 3 занести 11-разрядный код напряжения U_x , при котором возникла указанная погрешность.

Этот код делится на три группы: старшую, куда входит 3 разряда, среднюю и младшую по 4 разряда, как показано в таблице 3. Это делается для удобства преобразователя двоичного кода в шестнадцатиричный и десятичный, как пояснено в разделе 3.

Код старшей группы заранее занесён в таблицу 3, так как его значение определяет номер участка и известно до выполнения эксперимента, необходимо только сверить код старшей группы в таблице и на индикаторе.

3. После записи данных нулевого участка продолжить поверку на каждом из последующих участков нажатием кнопки ПУСК. Прерывание поверки (после прохождения каждого последующего участка) кнопкой СТОП выполнять по тому же признаку, что и на нулевом участке, т.е. в момент потухания светодиода с весом 2^6 и подсветки разряда 2^7 на табло АЦП. Об окончании поверки на всех участках свидетельствует потухание светодиода ИЗМЕР на макете.

4. Изменить полярность входного напряжения АЦП, поменяв местами провода, подключенные к гнездам ВХ. АЦП макета и повторить измерения в соответствии с таблицей 4.

5. Определить шестнадцатиричный и десятичный коды и вычислить погрешности δ_9 и $\delta_{доп}$ по формулам (3–1) и (3–2) для обеих полярностей.

Результаты внести в таблицу 3. Сделать выводы о соответствии АЦП паспортным данным. Если $\delta_3 < \delta_{\text{доп}}$, АЦП удовлетворяет предъявленным требованиям на данном участке. В этом случае в колонке “Выводы” поставить знак плюс, в противном случае поставить минус. Прибор удовлетворяет требованиям, если результаты исследования на всех участках отмечены знаком плюс.

6. Построить график в соответствии с пояснениями, данными на рисунке 2. Величину U_x нанести по горизонтальной оси в шестнадцатичном коде, в положительном и отрицательном направлениях. Отложить значения δ_3 по вертикальной оси с учётом знаков. Значение $\delta_{\text{доп}}$ отложить в положительную и отрицательную стороны по той же оси и полученные точки соединить кривыми.

Таблица 4

№№ участков	Данные эксперимента				Коды ΔN_{x0}		Погрешности		Выводы
	Двоичный код			ΔN_x	16– ричн.	дес.	δ_3 , %	$\delta_{\text{доп}}$, %	
	ст.	ср.	мл.						
0	000								
1	001								
2	010								
3	011								
4	100								
5	101								
6	110								
7	111								
Продолжить таблицу для отрицательных U_x									

4 Общая характеристика исследуемых динамических погрешностей

Динамическая погрешность возникает в случае, если измеряемая величина не является постоянной. Значение динамической погрешности

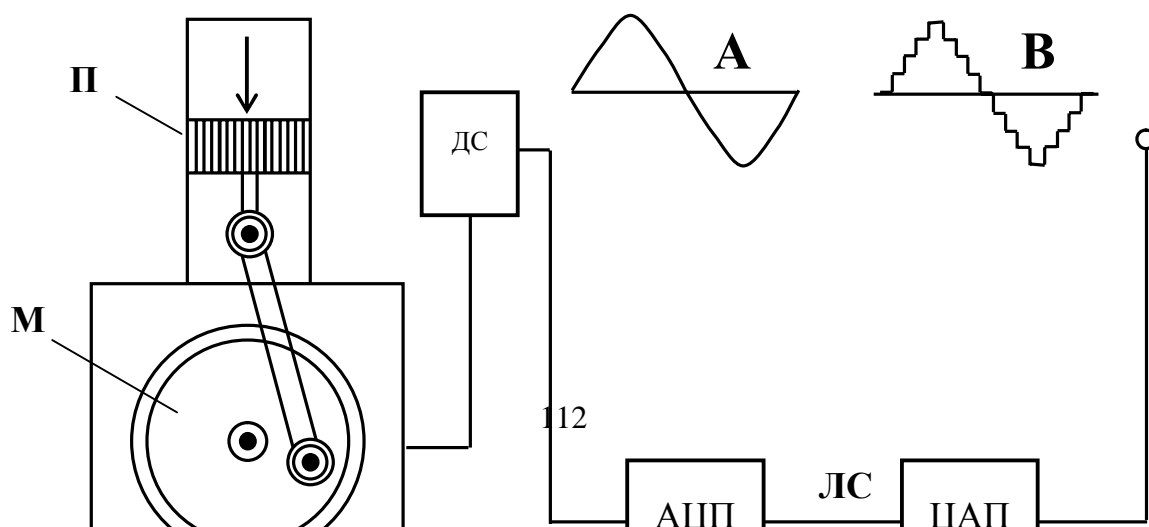
можно определить как разность между результатом измерения, полученным в определённый момент времени и действительным значением измеряемой величины в этот же момент.

Величина, характер и форма проявления динамической погрешности весьма многообразны, поэтому методика анализа погрешности не может быть универсальной для каждого конкретного случая. Динамические погрешности возникают как в аналоговых приборах, так и в устройствах дискретного действия.

Ниже даётся пример устройства, в котором возникают динамические погрешности, характер которых анализируется в данной работе.

На рисунке 3 показано дистанционное измерительное устройство для двигателей внутреннего сгорания, предназначенное для определения характеристики девиации скорости вращения коленчатого вала и маховика двигателя М. В момент зажигания горючей смеси ускоряется движение поршня П, а следовательно, возрастает скорость вращения вала двигателя. На АЦП поступает напряжение с выхода датчика девиации скорости ДС, которая имеет зависимость от угла поворота вала, напоминающую синусоиду (А). Полученный на выходе АЦП код из машинного зала передаётся по линии связи ЛС через промежутки времени, равные шагу дискретизации. На приёмном конце (в исследовательской лаборатории) код с помощью ЦАП преобразуется в аналоговую величину, которая поступает на экран лабораторного пульта.

Так как полученный код сохраняется до следующего измерения на экране будет получена ступенчатая характеристика девиации скорости вращения, отличающаяся от исходной (В).



В работе анализируются две составляющие динамической погрешности:

а) погрешность от запаздывания сигнала в процессе его преобразования и прохождения по линии связи;

б) погрешность аппроксимации синусоидальной характеристики девиации скорости (А) ступенчатой функцией (В).

В работе не ставится задача суммирования всех составляющих погрешности, в том числе статических погрешностей.

Рассматривается только частная задача анализа и суммирования упомянутых двух погрешностей. Результат решения этой задачи можно представить как составную часть общей погрешности, возникающей под действием многих факторов. Суммарная погрешность может определяться на основании “принципа суперпозиций” погрешностей, состоящий в том, что результирующая погрешность есть сумма отдельных составляющих, причём каждая составляющая может вычисляться при допущении, что остальные погрешности отсутствуют, т.е. равны нулю. [3]. Указанный принцип справедлив при условии, что абсолютная величина погрешности значительно меньше измеряемой величины.

В общем случае факторами, которые вызывают динамическую погрешность, могут быть:

1. Запаздывание результирующей функции относительно исходной из-за задержки в линии связи, смещения моментов дискретизации и т. д.
2. Тип используемого АЦП, его динамические характеристики, такие как длительность переходных процессов, время преобразования и т.п.
3. Частота дискретизации (длительность ступени дискретизации).

4. Форма исходного сигнала и способ восстановления функции (ступенчатая, кусочно–линейная, интерполяция и т.п.

5 Методика расчёта динамических погрешностей для синусоидальной и треугольной формы исходного напряжения

Рассмотрим методику расчёта погрешностей запаздывания и аппроксимации, которые анализируются в работе для исходных напряжений, имеющих синусоидальную и треугольную форму.

5.1 Уравнение погрешностей для синусоидальной формы напряжения

Процесс появления погрешности, возникающей в результате запаздывания результирующего напряжения U_2 относительно исходного U_1 на величину $t_{3П}$, представлен на рисунке 4. Ординаты мгновенного значения абсолютной погрешности показаны штриховкой. График зависимости мгновенного значения абсолютной погрешности $\Delta U(t)$, равный разности между U_1 и U_2 взятый в один и тот же момент времени, приведён на рисунке 4.

Зависимость $\Delta U(t)$ можно выразить уравнением:

$$\Delta U(t) = U_a \sin \frac{2\pi t}{T} - U_a \sin \frac{2\pi(t + t_{3П})}{T}$$

где U_a – амплитуда напряжений U_1 и U_2 .

Погрешность запаздывания представим в виде среднеквадратичного (с.к.) значения $\Delta_{3П}$

$$\Delta_{3П} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \Delta U^2(t) dt} = U_a \sqrt{2} \sin \frac{\pi t_{3П}}{T} \approx U_a \sqrt{2} \frac{\pi t_{3П}}{T}. \quad (5-1)$$

График на рисунке 5 иллюстрирует процесс появления погрешности аппроксимации. Измерение с помощью АЦП происходит через каждый интервал времени T_d , называемый шагом дискретизации. Полученный результат сохраняется до конца шага. В этом случае возникает разность

между результатом измерения и действительным значением измеряемой величины, которая увеличивается и достигает максимума в конце шага дискретизации (рисунок 5).

Эта разность является мгновенным значением погрешности аппроксимации $\Delta U(t)$, график которой представлен на рисунке 5б. Для определения с.к. погрешности форму функции рисунок 5б будет считать треугольной. В дальнейших выводах примем к сведению, что с.к. значение треугольных импульсов будет в $\sqrt{3}$ раз, а синусоидальных в $\sqrt{2}$ раз меньше значения прямоугольных импульсов с такой же амплитудой. Если в уравнении (5–1) $t_{3П}$ заменить на T_D получим с.к. значение прямоугольных импульсов.

Если в уравнении (5–1) $t_{3П}$ заменить на T_D получим с.к. значение прямоугольных импульсов.

С.к. значение суммарной абсолютной погрешности Δ^* выразим уравнением:

$$\Delta = \sqrt{\Delta_{3П}^2 + \Delta_{ап}^2}$$

Подставить значение $\Delta_{3П}$ и $\Delta_{ап}^*$ из (5–1) и (5–2) определим:

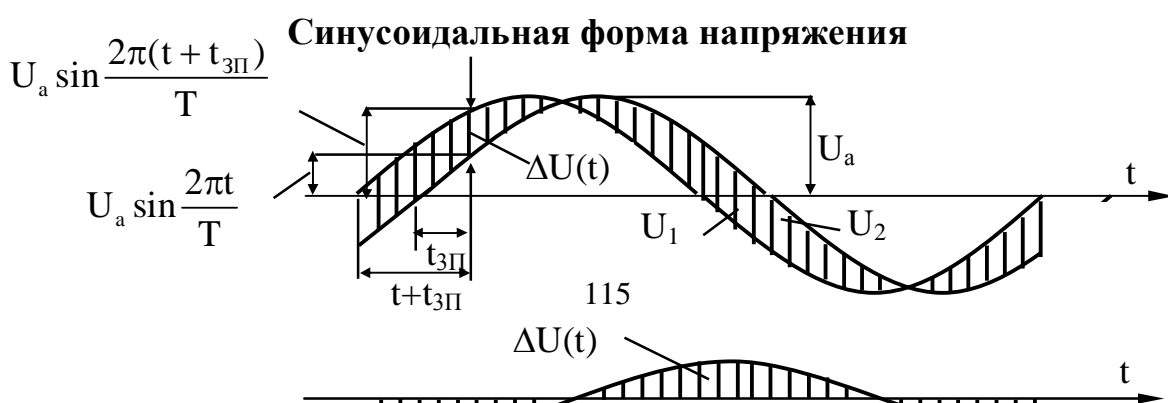
$$\Delta = \frac{U_a}{n} p \quad (5-3)$$

где $n = \frac{T}{T_D}$ – число шагов дискретизации за период;

$$p = \frac{\pi\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{3 \left(\frac{t_{3П}}{T_D} \right)^2 + 1} \text{ – постоянный коэффициент.}$$

Относительную с.к. суммарную погрешность получим, разделив Δ^* на с.к. значение синусоидального напряжения $U_a / \sqrt{2}$:

$$\delta = \frac{\sqrt{2}p}{n}.$$



5.2 Уравнение погрешностей для треугольной формы исходного напряжения

Определим уравнение для погрешностей для треугольной формы кривой по аналогии с методикой изложенной в разделе 5.1.

Графики для погрешности запаздывания даны на рисунке 6. С.к. значение погрешности запаздывания $\Delta'_{\text{зп}}$ определим для четверти периода, т. к. уравнение для напряжения треугольной формы может быть определено только для четверти периода в виде:

$U(t) = U_a \frac{4t}{T}$, где t – временная переменная. Результат расчёта не будет отличаться от $\Delta_{\text{зп}}$ за целый период.

По аналогии с разделом 5–1 получим уравнение для мгновенного значения абсолютной погрешности запаздывания:

$$\Delta U(t) = U_a \frac{4t}{T} - U_a \frac{4(t + t_{\text{зп}})}{T} = U_a \frac{4t_{\text{зп}}}{T} = \Delta'_{\text{зп}} \quad (5-4)$$

Т.к. $\Delta U(t) = \text{const}$, мгновенное значение будет равно среднеквадратичному.

Графики для определения с.к. значения погрешности аппроксимации представлены на рисунке 7. Рассуждая аналогично предыдущему, уравнение для с.к. значения погрешности аппроксимации $\Delta'_{\text{ап}}$ получим, заменив в (5–4) значение $t_{\text{зп}}$ на $T_{\text{д}}$ разделив результат на $\sqrt{3}$:

$$\Delta'_{\text{ап}} = U_a \frac{4T_{\text{д}}}{T\sqrt{3}}. \quad (5-5)$$

Суммарное с.к. значение абсолютной погрешности выразим уравнением:

$$\Delta' = \sqrt{(\Delta'_{\text{зп}})^2 + (\Delta'_{\text{ап}})^2}.$$

Подставив значения $\Delta'_{\text{зп}}$ и $\Delta'_{\text{ап}}$ из (5–4) и (5–5), найдём

$$\Delta' = \frac{0,9U_a p}{n} \quad (5-6)$$

где $n = \frac{T}{T_{\text{д}}}$ – число шагов дискретизации за период

$$p = \frac{\pi\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{3\left(\frac{t_{\text{зп}}}{T_{\text{д}}}\right) + 1} - \text{постоянный коэффициент.}$$

Относительную с.к. суммарную погрешность получим, разделив Δ' на с.к. значение треугольного напряжения $U_a / \sqrt{3}$:

$$\delta' = \frac{0,9\sqrt{3}P}{n}.$$

6 Описание лабораторного макета для измерения динамической погрешности

Испытуемое напряжение синусоидальной или треугольной формы поступает от генератора испытуемого напряжения ГС с регулируемыми частотой и амплитудой на вход АЦП.

Принцип работы лабораторного макета иллюстрируется графиком рисунка 8, а его упрощенная схема дана на рисунке 9.

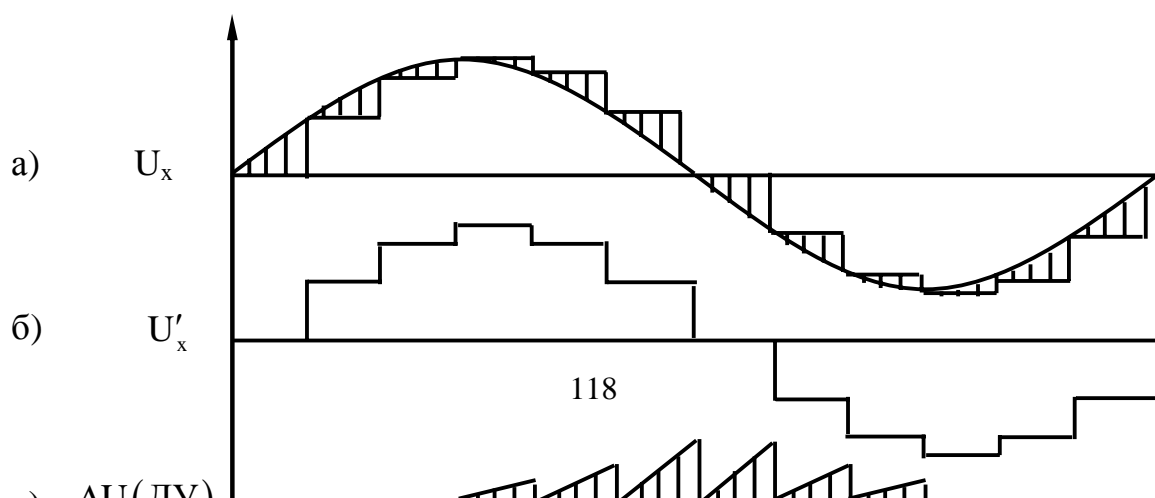
Испытуемое напряжение рисунок 8,а подается на АЦП и формирователь Φ , который выдает короткий импульс в момент перехода испытуемого напряжения через нулевое значение в положительном направлении (рисунок 8,г). Этот импульс сбрасывает делитель частоты ДЧ, представляющий собой счетчик с объемом N в начальное положение. На счетчик ДЧ проходят импульсы от внутреннего генератора макета ГИ, частота которого во много раз больше частоты исследуемого сигнала (рисунок 8д).

Импульс переполнения счетчика ИП запускает АЦП (рисунок 8,е). Таким образом, АЦП запускается с периодом равным времени переполнения ДЧ. Этот период является шагом дискретизации T_d . Длительность T_d равна произведению периода T_d внутреннего генератора ГИ на объем счетчика N и является постоянной величиной

$$T_d = T_d N = \text{const.}$$

Процесс повторного запуска АЦП продолжается до окончания периода T , когда формирователь Φ снова выдает короткий импульс и сбрасывает счетчик ДЧ в нулевое положение, обеспечивая формирование T_d , начало которого совпадает с началом периода. Число шагов дискретизации n за период T определяется уравнением

$$N = T/T_d.$$



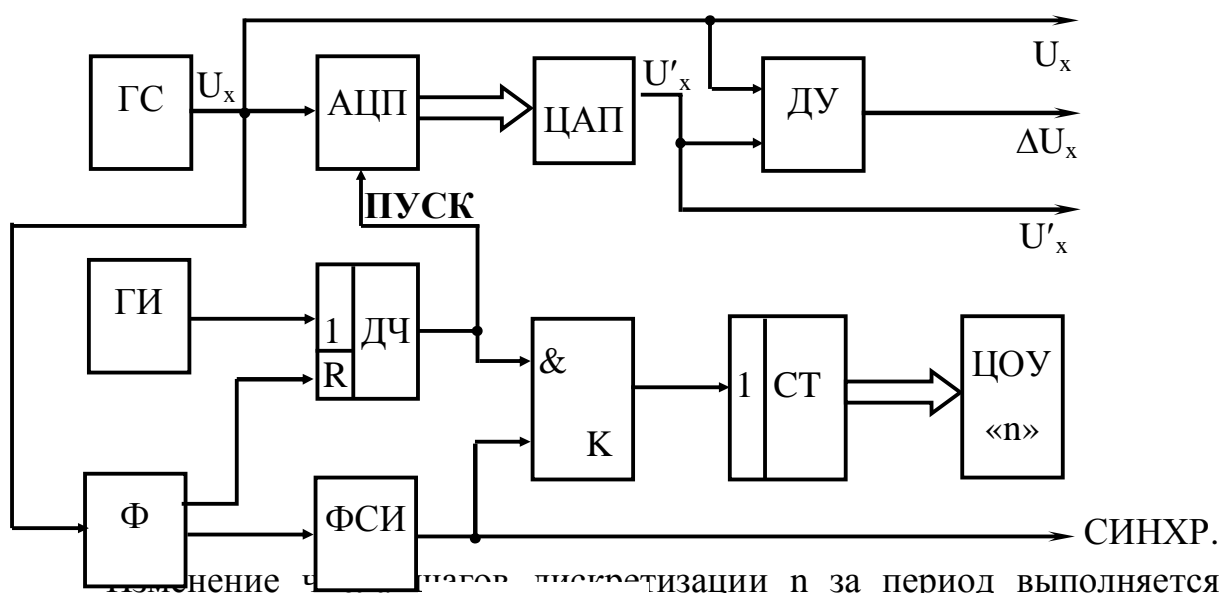


Рисунок 9

Изменение числа шагов дискретизации n за период выполняется путем измерения периода T этого напряжения T регулировкой частоты генератора испытываемого напряжения ГС. Число шагов дискретизации подсчитывает счетчик СТ на вход которого поступают импульсы запуска АЦП в течение длительности периода. Импульс, открывающий ключ К на время T , получают с выхода формирователя строб-импульса (ФСИ), работающего от импульсов формирователя Ф. Код с выхода АЦП поступает на ЦАП, который формирует ступенчатое напряжение пропорциональное коду, и поступающее на вход дифференциального усилителя ДУ (рисунок 8б). На второй вход ДУ подается исходное

напряжение U_X (рисунок 8а). Выходное напряжение ДУ равно разности напряжений на входах ΔU (рисунок 8в). Форма выходного напряжения ДУ показана на графике штриховкой. Это напряжение пропорционально мгновенному значению суммарной погрешности. На выходе ДУ включен вольтметр среднеквадратичного (эффективного) значения напряжения, показания которые равны с.к. значению суммарной абсолютной погрешности.

На переднюю панель лабораторного макета для подключения осциллографа выведены сигналы U_X , U'_X , ΔU_X и сигнал синхронизации осциллографа.

Опыт 2. Наблюдение осциллограмм и построение графиков процессов возникновения динамической погрешности

Собрать схему эксперимента. Для чего выполнить следующие соединения: выход ГС соединить с гнездами ВХ. АЦП макета; разъем входного кабеля ЦАП соединить с разъемом ВЫХ. АЦП макета; выход ЦАП (зажимы ВП и НП соединить с гнездами ВХ. U'_X макета) при этом для операции вычитания U'_X и U_X необходимо, чтобы клемма НП цифроаналогового преобразователя была соединена с гнездом \perp макета. На панели ЦАП кнопка СЛЕДЯЩИЙ должна быть отпущена.

Тумблер макета РЕЖ., имеющего два положения СТАТ. И ДИНАМ. установить в положение ДИНАМ. т.к. будет исследоваться динамическая погрешность. Включить питание макета, ЦАП и ГС.

Опыт выполняется в такой последовательности:

1. Установить на ГС синусоидальную форму сигнала с амплитудой 5–8 В и диапазон частоты 100–1000 Гц, Для временной привязки всех сигналов использовать внешнюю синхронизацию осциллографа сигналом, снимаемым с макета.

Пронаблюдать, изменяя n , исходное напряжение U_X , восстановленное U'_X и мгновенное значение абсолютной погрешности ΔU_X , включая на двухканальный осциллограф два каких-либо процесса с выходов макета.

Число отсчетов n индицируемое на ЦОУ, регулировать перестройкой частоты ГС.

2. Повторить указанные эксперименты для треугольной формы напряжения.

3. Построить эскизы графиков, показанных на рис. 4–7 для исходных величин, заданных преподавателем. Построенные графики показать преподавателю.

Опыт 3. Исследование экспериментальным и расчетным путем зависимости суммарной погрешности от числа отсчетов

Опыт выполняется в такой последовательности.

Переписать данные АЦП и ЦАП, указанные на лицевых панелях:

а) время преобразования АЦП $t_{\text{АЦП}} = \dots$;

б) время преобразования ЦАП $t_{\text{ЦАП}} = \dots$;

Подготовить данные для расчета:

а) время дискретизации $T_d = 100$ мкс;

б) время запаздывания $t_{\text{зп}} = t_{\text{АЦП}} + t_{\text{ЦАП}} = \dots$;

в) коэффициент $P = \frac{\pi\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{3 \left(\frac{t_{\text{зп}}}{T_d} \right)^2 + 1} =$;

г) в таблицу 5 внести исходные величины, заданные преподавателем:

U_a , n_1 , n_2 , ..., n_5 .

Таблица 5

$U_a =$				
n	Синусоидальная форма		Треугольная форма	
	Δ , В	ΔU_X , В	Δ' , В	$\Delta U'_X$, В
$n_1 =$				
$n_2 =$				
$n_3 =$				
$n_4 =$				
$n_5 =$				

2. Установить на ГС синусоидальную форму напряжения. С помощью вольтметра с.к. значений, подключенного к гнезду « ΔU_X » макета

измерить среднеквадратическую суммарную абсолютную погрешность ΔU_X для заданных значений напряжения U_a и числа отсчетов n . Полученные результаты внести в таблицу 5.

3. Установить на ГС треугольную форму напряжения и выполнить эксперименты, указанные в пункте 2. Полученные результаты внести в таблицу 5.

4. Определить расчетным путем значения суммарной абсолютной погрешности при синусоидальной и Δ' треугольной форме напряжения для значений U_a и n , данных в таблице 5. Полученные расчетные величины внести в таблицу 5. Расчеты выполнить по формулам (5–3) и (5–6) соответственно для синусоидальной и треугольной формы напряжения.

Сравнить экспериментальные и расчетные значения погрешностей, построив на одном графике зависимости для синусоидального напряжения:

$$\Delta = f_1(n) \text{ и } \Delta U = f_2(n),$$

а на другом для треугольного:

$$\Delta' = f_3(n) \text{ и } \Delta U'_X = f_4(n)$$

Содержание отчета

Отчет должен содержать структурные схемы измерения статической и динамической погрешностей, таблицы 4.5 с результатами измерений и вычислений, а также график сравнения экспериментальных и допустимых статических погрешностей, эскизы графиков, поясняющих процесс появления динамических погрешностей.

Контрольные вопросы

Принцип действия измерительных установок для исследования статических и динамических погрешностей. Методика сравнения экспериментальных и допустимых статических погрешностей. Понятие о динамических погрешностях и методика их расчёта. Методика графической иллюстрации процессов появления динамических погрешностей.

Литература

1. Вострокнутов Н.Н. Цифровые измерительные устройства. – Москва: Энергоатомиздат, 1990 г.
2. Чинков В.Н. Цифровые измерительные приборы. –Министерство обороны, 1992 г.
3. Горлач А.А., Минц М.Я., Чинков В.Н. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике. –Киев: «Техника», 1991 г.